



21世纪职业教育创新型教材

城市轨道交通

车辆电气 控制

主编 杨勇



北京工业大学出版社

内容提要

本书是根据城市轨道交通培养方案和职业学校学生培养要求编写的项目式教材。依据内容需要,本书设置了6个大项目,对城市轨道交通车辆电气控制进行了精练的阐述。内容主要包括:城市轨道交通车辆电气控制系统构成、城市轨道交通车辆牵引传动系统、城市轨道交通车辆车门控制系统、城市轨道交通车辆空调电气控制系统、城市轨道交通车辆辅助供电系统、电气指令式制动控制系统。

本书可作为职业教育城市轨道交通专业的教学用书和实验实训指导书,也可作为从事车辆电气控制工作的工程技术人员的参考用书以及城市轨道交通技术培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通车辆电气控制 / 杨勇主编. —北京:
北京工业大学出版社, 2020.8
ISBN 978-7-5639-7261-6

I. ①城… II. ①杨… III. ①城市铁路—铁路车辆—
电气控制—职业教育—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第297244号

城市轨道交通车辆电气控制

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG CHELIANG DIANJI KONGZHI

主 编: 杨 勇

责任编辑: 张 悦

封面设计: 易 帅

出版发行: 北京工业大学出版社

(北京市朝阳区平乐园100号 邮编: 100124)

010-67391722 (传真) bgdcbs@sina.com

经销单位: 全国各地新华书店

承印单位: 天津市蓟县宏图印务有限公司

开 本: 787毫米×1092毫米 1/16

印 张: 16.5

字 数: 330千字

版 次: 2020年8月第1版

印 次: 2020年8月第1次印刷

标准书号: ISBN 978-7-5639-7261-6

定 价: 49.50元

版权所有 翻印必究

(如发现印装质量问题,请寄本社发行部调换 010-67391106)

前

言

目前全国轨道交通在建里程超过5000公里，大部分将于“十三五”期间建成。“十三五”期间我国新增城轨里程数达到5640公里，到2020年城轨里程总数将达到或超过9000公里。中国将成为世界最大的轨道交通市场。轨道交通的迅速发展，带动了对轨道交通人才的需求。目前轨道交通领域人才缺口非常大，如从事施工、维修养护、通信信号系统、运营管理、监理等专业人才。未来，我国将需要大量的城市轨道交通方面的专业人才，培养高级应用技能型专业人才是职业教育的目标，是摆在教育工作者面前的重要任务。

教材是教学工作的重要载体之一，面对当前职业教育城市轨道交通车辆电气控制专业学生适用教材很少的现状，为了满足城市轨道交通专业职业教育的需要，编者紧紧围绕应用型人才培养目标做了大量的调研，坚持理论联系实际的原则，结合城市轨道交通相关岗位的需求，并运用多年教学经验将理论知识和操作技能进行了深度融合，编写了本教材。

本书突破传统的教材编写模式，注重实用性，内容编排重点突出，以学生为中心、以工作过程为导向，理论与实际动手相结合，突出职业教育的实践性。每个项目前设置了项目导读、知识目标、能力目标，项目后设置了项目小结和学习检测，留给学生较大的思维空间和探索空间，使其在学习过程中自觉地获取知识和经验，逐渐构建自己的知识体系。

本教材在编写过程中，得到许多城市轨道交通车辆电气控制专家的大力支持和热情帮助，在此表示衷心的感谢！编写过程中编者参考并引用了城市轨道交通车辆电气控制专业的技术专家、学者的著作与成果，在此表示衷心的感谢！

由于编者经验和水平有限，本教材在资料和数据引用上不够全面，虽然编者做了大量工作，付出很大努力，但书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者



项目一 城市轨道交通车辆电气控制系统构成 1

- 任务一 城市轨道交通车辆电气控制系统基本概念 1
- 任务二 城市轨道交通车辆电气控制系统主要部件功能 6
- 任务三 城市轨道交通车辆运行工况与受力分析 31

项目二 城市轨道交通车辆牵引传动系统 42

- 任务一 车辆电气牵引系统 42
- 任务二 直流牵引传动系统 53
- 任务三 交流牵引传动系统 75
- 任务四 直线电动机牵引传动系统 103

项目三 城市轨道交通车辆车门控制系统 116

- 任务一 城市轨道交通车辆客室侧门的结构及原理 116
- 任务二 城市轨道交通车辆客室侧门的控制 128
- 任务三 城市轨道交通车辆车门的操纵 137
- 任务四 屏蔽门系统 143

项目四 城市轨道交通车辆空调电气控制系统 149

- 任务一 车辆空调系统 149
- 任务二 空调制冷基本原理及系统布置 153
- 任务三 车辆空调系统部件 157
- 任务四 通风系统 166
- 任务五 车辆空调系统控制 171

项目五	城市轨道交通车辆辅助供电系统	182
任务一	城市轨道交通车辆辅助供电系统及供电电路	182
任务二	城市轨道交通车辆辅助供电系统电路分析	189
任务三	城市轨道交通车辆蓄电池电源及其控制	205
项目六	电气指令式制动控制系统	218
任务一	电气指令式制动控制系统分类	218
任务二	电磁空气制动机	220
任务三	克诺尔电空制动机	227
任务四	SD型电空制动机	243
参考文献		257

项目一

城市轨道交通车辆电气控制系统构成

项目导读

本项目系统阐述了城市轨道交通车辆电气控制系统的组成及功能，阐述了主要电气部件的结构原理、技术参数、功能作用，分析了城市轨道交通车辆的运行工况、牵引力和制动力的形成。通过学习本项目，学生可以了解城市轨道交通车辆电气控制系统构成的基本知识，为下一步学习其他方面的知识打下坚实的基础。

知识目标

- 1.了解城市轨道交通车辆电气控制原理。
- 2.了解城市轨道交通车辆电气部件与设备。
- 3.了解空转和滑行的形成，会进行车辆空转和滑行的保护处理。
- 4.了解主电路电器的基本知识和工作原理。
- 5.了解控制电路电器的基本知识和工作原理。

能力目标

- 1.能够掌握城市轨道交通车辆电气控制系统的组成。
- 2.能够进行城市轨道交通车辆受力分析和列车运行工况分析。
- 3.能够分析牵引力和制动力的形成。
- 4.能够掌握牵引动力装置的结构和工作原理。
- 5.能够掌握城市轨道交通车辆主要电器的结构及原理。

任务一 城市轨道交通车辆电气控制系统基本概念

城市轨道交通系统是指在城市中使用车辆在固定导轨上运行并主要用于城市客运的交通系统。城市轨道交通的定义为：以电能为动力，采取轮轨运输方式的快速大运力公共交通的总称。城市轨道交通车辆作为一种便捷的交通工具，最根本的任务是承载旅客完成由甲地往乙地的运输任务。车辆运行的速度及其控制是城市轨道交通车辆完成运输任务的关键。

城市轨道交通车辆的运行速度受多方面因素约束，如列车运行图、区间及车站信号、线路状况、列车上各功能设备的状态、乘客舒适度、行车安全性等。因此，对城市轨道交通车辆的控制就是根据这些约束条件进行综合处理并形成最终的结果，即列车应该以何种方式或何种速度运行，并将这个决策贯彻至车辆控制系统的每一个控制单元。

一、城市轨道交通车辆电气控制系统概述

城市轨道交通车辆控制系统根据运营系统给出的命令对各功能子系统进行调控，并在各个功能级上（如牵引控制、制动控制等）保证列车运行要求的实现。其主要特征是控制，即控制策略和控制手段的实现。数学模型化的控制方法和传统的PID（乘客导向系统）调节在城市轨道交通车辆控制中已经取得了重要的成果，但是由于控制参数的多变性和离散性，以及系统的非线性和子系统结构的可变性，加大了PID调节的复杂性和困难程度，因此利用人工智能原理的各种控制方法，特别是在网络环境下的控制方法，也逐步应用于车辆控制系统中。

城市轨道交通车辆控制系统或是列车和外围系统的接口，都通过无线方式与地面联网，以满足整个运营系统调控和旅客信息服务的要求。因此城市轨道交通车辆需要提供一个良好的人机界面，使驾驶员能随时了解整个列车的运行状态和各主要单元部件的工作状态，以便在必要时进行人工干预。城市轨道交通电动列车驾驶员在操作时，只需发出一些简单的命令，而不必知道命令由谁来执行。

城市轨道交通车辆需要带有系统操作软件和大容量存储器的高级控制机（微机控制系统）来作为控制核心，并选择传送信息量大且有实时性的网络（总线控制）来连接它们，以保证网络连接和实时响应。在车辆控制系统中，还需要直接面向现场完成I/O（输入/输出）处理，并能实现直接数字控制的智能化装置，将现场的各种实时过程变量实现数字化转换，并将这些变量送往功能层的相应控制子系统。可以这样说，城市轨道交通车辆上的各个设备，通过机械、电气、电磁、网络等，形成一个统一的整体，通过驾驶员操纵实现列车运行的控制。而对于装置有列车自动控制（ATC）系统的电动列车，还可实现城市轨道交通系统的列车自动驾驶（ATO）、列车自动保护（ATP）、列车自动监控（ATS）、列车通信控制（TCC）等全自动控制。城市轨道交通车辆电气控制系统主要由主牵引传动系统、牵引/制动控制系统、辅助供电系统和车门控制系统组成。

城市轨道交通车辆控制原理如图1-1所示，首先动力电源电流由变电所送到接触网经受流器（受电弓）引流到车辆，然后经过车辆牵引传动控制系统将电流送入牵引电动机，牵引电动机驱动车辆运行，驾驶员通过操纵驾驶室控制装置改变牵引电动机的运行速度和运行方式，此时电流经过车辆轮对、钢轨（或回流装置）回到变电所，形成闭合回路。

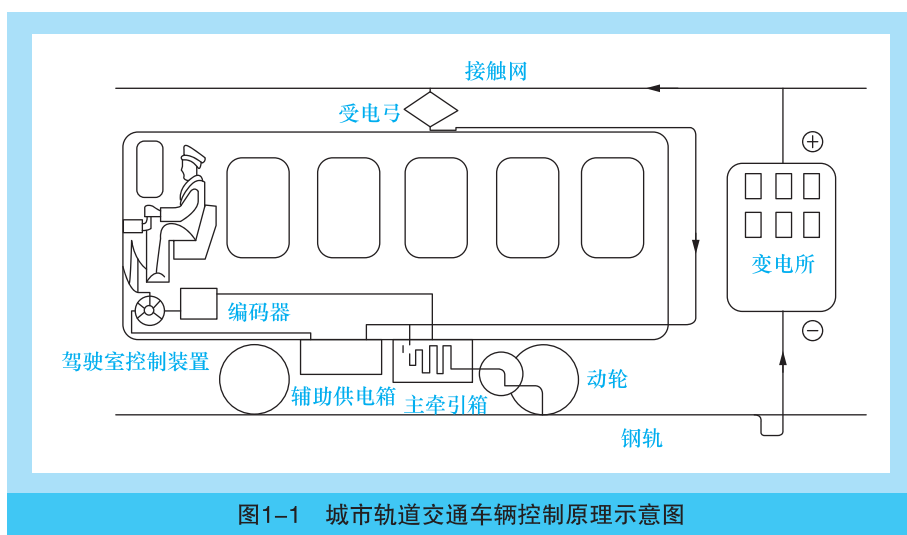


图1-1 城市轨道交通车辆控制原理示意图

图1-2为城市轨道交通车辆电气控制系统的组成框图。

城市轨道交通车辆的主牵引传动系统（主电路系统）是列车牵引动力和电制动力得以实现的载体。

辅助供电系统为城市轨道交通车辆提供辅助供电，其主要为下列系统提供电源：为主传动系统提供通风冷却中压电源和控制通信低压电源；为制动系统的空气压缩机提供中压电源和控制通信低压电源；为全车提供客室正常照明、应急照明；为空调系统提供中压电源和控制通信低压电源；为列车的自动控制系系统、通信及列车综合管理系统提供低压电源。

牵引/制动控制系统是列车实现牵引和制动控制相关功能的控制电路系统，通过电气、器件的组合实现一定的逻辑功能，通过单元模块的控制程序运算，再经列车通信控制系统的实时响应，最终实现对列车的有效控制。

车门控制系统关系到城市轨道交通车辆的运营安全及乘客的人身安全，因此在城市轨道交通车辆中，将客室车门的状态直接与列车的运行状态相关联，通过列车信息显示系统，告知和提醒驾驶员所有车门的状态，从而保证行车的安全。图1-3所示为驾驶员驾驶城轨车辆。

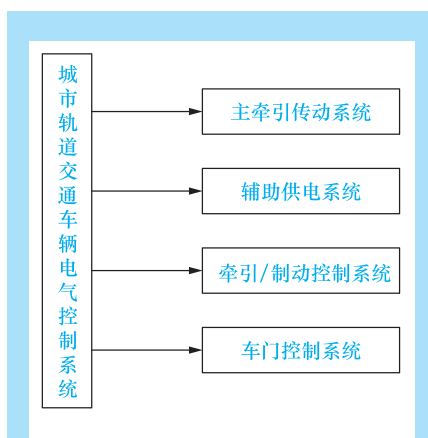


图1-2 城市轨道交通车辆电气控制系统的组成框图



图1-3 驾驶员驾驶城轨车辆

二、城市轨道交通车辆总体控制

城市轨道交通车辆的控制实际上是对牵引电机的控制。在轨道交通运输中，采用电动机机械传动来满足车辆牵引的电气部分，称为电力牵引传动控制系统。它是以牵引电动机为控制对象，通过控制系统对电动机的速度和牵引力进行调节，以满足车辆牵引和制动特性的要求。根据电动机形式的不同，控制系统可分为两大类，即采用直流牵引电动机的直流传动控制系统和采用交流牵引电动机的交流传动控制系统。

利用电机的可逆性原理可以完成车辆牵引和电制动工况的控制。在牵引工况时，牵引电机用作电动机运行，城市轨道交通车辆通过受电弓将接触网的DC1500V（DC750V）电能引入车底架下部高压箱中，在高压箱中受高速断路器控制后，经牵引逆变器送入牵引电动机，牵引电动机驱动车辆轮对从而牵引列车。在电制动工况时，牵引电机用作发电机运行，通过牵引电机将列车的动能转化为电能，并经牵引逆变器、高速断路器、受电弓等将电能反馈给电网。如果电能不能反馈给电网，则通过牵引逆变器和制动电阻以热能的形式散发掉。图1-4所示为城市轨道交通车辆单元车的总体控制。

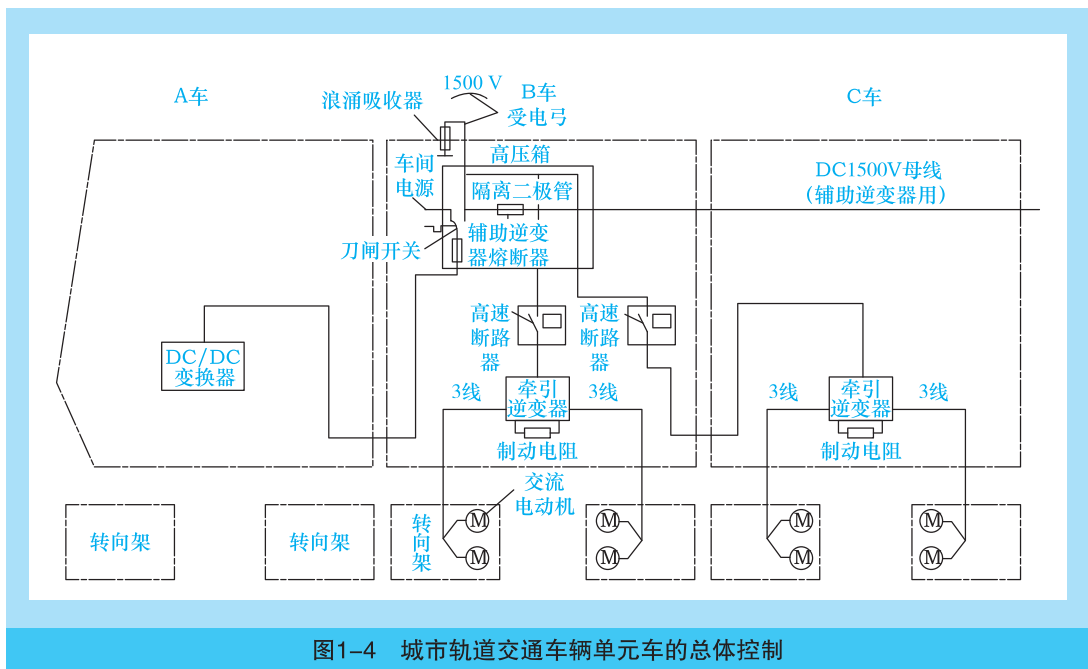


图1-4 城市轨道交通车辆单元车的总体控制

三、城市轨道交通车辆电气部件与设备

城市轨道交通车辆电气控制系统物化为车辆上的各种电气部件、设备及其控制电路。城市轨道交通车辆内部设备包括：服务于乘客的车体内固定附属装置和服务于车辆运行的设备。服务于乘客的设备有客室照明、通风、空调、座椅、扶手等；服务于车辆运行的设备有蓄电池箱、继电器箱、主控制箱、电动空气压缩机组、总风缸、电源变压器、各种电气开关和接触器等。除此之外，还有保证列车安全、正常、舒适运行的其他系统，如列车诊断系统、列车自动控制系统（ATC）、通信系统等。

以庞巴迪公司与长春客车厂生产的地铁车辆为例，其主要设备配置如图1-5所示。在城市轨道交通电动列车中，动车和拖车通过车钩连接成的一个相对固定的编组称为一个（动力）单元。一列车可以由一个或几个单元编组组成。图示列车为两单元六节编组，记为 $-A*B*C=C*B*A-$ ，B为带受电弓的动车，C为动车（分别记作 M' 、 M ），A为带驾驶室的拖车（记作 T_c ），图示列车也称为4M2T编组列车。PH箱（高压箱）位于B车底架下部的牵引高压箱内，高速断路器位于PH箱（高压箱）的高压区内，与B、C车的逆变器箱相连接。PA箱位于C车底架下部，主要由C车的逆变器和辅助逆变器组成。



图1-5 地铁车辆的主要设备配置

列车的各车辆间电气设备靠密接式车钩实现机械、电气、气路的整体连接。其中每一节列车的两端（A车驾驶端）装有全自动车钩，B车通过半永久牵引杆与A车和C车连接，C车之间通过半自动车钩连接。

 小贴士

庞巴迪公司（Bombardier Inc.）：成立于1942年，是全球唯一同时生产飞机和机车的设备制造商，是全球第三大民用飞机制造商，业务覆盖60余个国家，员工超过7万人，是加拿大与中国往来较多的著名公司和经济团体。

 **任务二 城市轨道交通车辆电气控制系统主要部件功能** 

城市轨道交通车辆电气控制系统部件是用来对城市轨道交通车辆以及其他的牵引设备进行切换、检测、控制、保护和调节的电器及装置，称为牵引电器。牵引电器的工作条件和环境较为恶劣，如长时间受振动干扰、受灰尘侵袭，工作环境温度和湿度变化范围大，工作电压和电流变化范围大，并且受安装位置和空间的限制。为有效利用空间、便于检修，电器外形多呈平整的箱状且宽度小，以便将电器尽可能成列布置。电器结构方面要便于更换触头、弹簧和其他易磨损的零件。在零件的机械与电气强度方面，要求在电器操作次数频繁时仍有较大的安全因数，同时必须保证有最大的可靠性。

牵引电器一般分为主电路电器、控制电路电器和辅助电路电器三大部分。

一、主电路电器

城市轨道交通车辆主电路电器主要包括受电弓、高速断路器、主接触器、线路滤波器、制动电阻器、平波电抗器、浪涌电压吸收器和接地装置等。

（一）受电弓

1. 城市轨道交通车辆的供电与受流

因地铁和轻轨交通运输对速度的要求不高，所以常采用直流供电。直流供电的电压制式较多，其发展趋势是采用IEC（国际电工委员会）标准中的DC600V、DC750V、DC1500V三种，我国国家标准《城市轨道交通直流牵引供电系统》中规定采用DC750V（波动范围500~900V）和DC1500V（波动范围1000~1800V）两种。

我国常用的供电方式有接触网供电和接触轨供电两种形式。电动列车的受流方式依据供电方式的不同分为接触网受流和第三轨受流。接触网供电是指通过沿轨道线路上空架设的特殊输电线向行走在线路上的电动列车不间断地供应电能。电动列车利用顶部的受电弓与接触网滑动摩擦而获得电能。接触轨供电是指在列车行走的两条路轨以外，再加上带电的钢轨（一般使用钢铝复合轨）。带电钢轨设于两轨之间或其中一轨的外侧。列车受流器（集电装置，也叫集电靴或取流靴）在带电轨上接触滑行取流。

通常城市轨道交通车辆在电网电压为1500 V时多采用架空接触网形式，由安装在车辆顶部的受电弓集电。当电网电压为750 V及以下时，较多由第三轨受电。例如，北京地铁、天津轻轨均采用DC750V电压、第三轨供电方式；上海地铁、广州地铁的大部分线路采用DC1500V电压、高架接触网供电方式。

2. 受电弓的结构组成

受电弓是城市轨道交通车辆的受流装置，安装在与车体几何中心点最近的车顶上部。当受电弓升起时，弓与网接触滑行，从接触网受取电流，通过车顶母线传送到车辆内部，供车辆设备使用。受电弓根据驱动动力的不同分为气动弓和电动弓两类。气动弓使用较普遍，故本项目以气动受电弓为例进行分析。

城市轨道交通车辆的受电弓为单臂、轻型结构。在4M2T编组的列车中，受电弓一般安装于B车车顶；在2M2T编组的列车中，受电弓一般安装于A车车顶。

单臂受电弓的结构组成如图1-6所示。基础框架1由方形的中空钢管、角钢及钢板的焊接构件组成，通过支持绝缘子3固定安装在车顶，作为框架4、轴承、下部导杆的轴承滑轮、拉伸弹簧的悬挂及气压升弓传动装置的支承和安装部分。框架包括下部支杆5、下部导杆6、上部支杆7和上部导杆8，框架采用高强度冷拔无缝管制作。高度止挡2安装在下部导杆侧下方的基础框架上，用以限制受电弓的最大升弓高度不超过2050 mm（从绝缘子3的下部边缘测量起），保证受电弓垂向不产生位移。高度止挡2可通过受电弓两侧的两个螺栓及沉头螺母加以调节，最高位时两个螺栓同时与底架接触。弓头是弓与网相接触的部分，主要由集流头9、接触带10、转轴、端角11和弹簧盒组成。集流头9为轻型钢结构，接



图1-6 单臂受电弓的结构组成

触滑块共两对，为人工石墨材料，每对两条，总计4条碳滑块。端角11是为了防止在接触网分叉处接触导线进入集流头底下而造成刮弓事故。弹簧盒的作用是为了保证弓头的垂向自由度。整个受电弓安装在4个绝缘子上。绝缘子由环脂充填树脂制成，通过M20的不锈钢螺母安装在车顶。升降弓装置12由传动风缸、拉伸弹簧及气路电磁阀组成。件13是由软编织铜线制成的电流传送装置。件14是保证降弓后车辆稳定运行的吊钩闭锁器。

3. 受电弓的工作原理

受电弓靠滑动接触受流，是移动设备与固定供电装置之间的连接环节，其性能的优劣直接影响城市轨道交通车辆工作的可靠性。对受电弓受流性能的基本要求是：集流头与接触网接触可靠、磨损小；升降弓时对车顶设备不产生有害冲击；运行中受电弓动作轻巧，动态稳定性能好。为此，在接触导线高度允许变化的范围内，要求受电弓滑板对接触导线有一定的接触压力，且升降弓的过程应具有先快后慢的特点，即升弓时集流头离开基础框架要快，贴近接触导线要慢，以防止弹跳；降弓时，弓与网的脱离要快，落在基础框架上要慢，以防止拉弧及对车顶产生有害的机械冲击。

受电弓的提升依靠升弓弹簧完成，降弓是通过传动风缸内部的降弓弹簧来实现的，其中压缩空气在传动风缸的充气及排气决定了受电弓的升与降。

(1) 升弓过程。在列车及驾驶控制台激活的情况下，按下副驾驶控制台受电弓升弓按钮，相应的升弓电路工作，升弓电磁阀得电动作，打开风源至传动风缸的通路，传动风缸充气后压缩其内部的降弓弹簧，在升弓弹簧的作用下克服自身重力升起。

风路系统：压缩空气经升弓电磁阀进入空气过滤器，经过滤器除水、除尘并净化，通过空气管路进入升弓节流阀。升弓节流阀调节压缩空气的流速，以确保受电弓的升弓速度。再经精密调压阀对压缩空气进行调节，以保证弓对网的工作压力。此压缩空气再经降弓节流阀后的安全阀，以保证工作压力不超过规定压力。最后压缩空气到达车顶受电弓风缸。升弓风路示意图如图1-7所示。

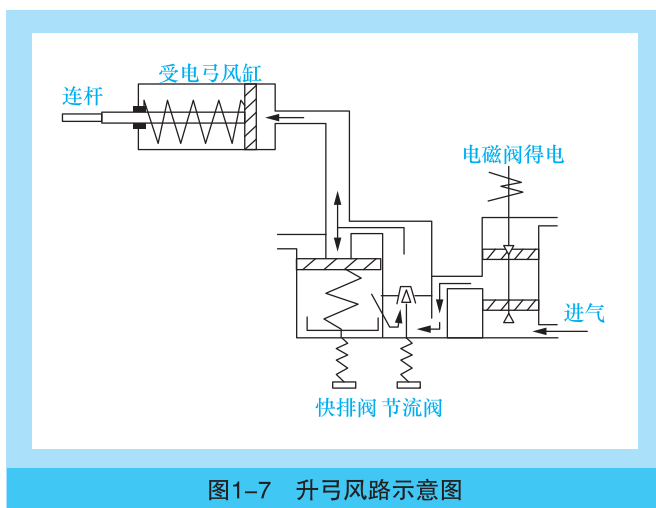


图1-7 升弓风路示意图

压缩空气经过空气回路和气动组件进入升弓风缸后，推动活塞动作，将压缩空气能量转化为气缸活塞的直线位移。驱动转臂将活塞直线位移转化成转臂的旋转运动，转臂带动下导杆向上旋转，上部框架在导杆的作用下作逆转运动，使集流头升起。弓头上的集电装置在上框架导杆的作用下保持水平上升，以确保与接触网的接触良好。

升弓初始时，降弓弹簧的压力最小，因此克服该力所需的风压较小，此时节流阀进出风压差最大，所以此时传动风缸的活塞杆左移较快。随着弓不断升起，降弓弹簧的压力不断增大，克服该力所需的风压也不断增大，而且此时节流阀口的风压差不断减小，所以活塞杆左移渐慢，升弓速度也渐慢，这样就可避免升弓时弓对网造成过分冲击。可以通过改变节流阀口的大小来初步调整升弓时间。

(2) 降弓过程。在列车及驾驶控制台激活的情况下，按下副驾驶控制台受电弓降弓按钮，电磁阀失电复位，风源停止向传动风缸供风，同时将压缩空气排向大气，受电弓在降弓弹簧及自身重力的作用下降到最低位置。

降弓风路示意图如图1-8所示。降弓过程分为两个阶段，即先快后慢。降弓时，当电磁阀失电，传动风缸内的压缩空气经快排阀口排出，如图1-8(a)所示。随着传动风缸内压缩空气压力骤然下降，压力差不足以克服快排弹簧的作用，快排活塞上移，使快排阀口关闭。此时传动风缸内的残余风在节流阀口徐徐排出，如图1-8(b)所示。降弓初期弓与网快速分离，可以避免降弓过程中产生电弧，灼伤接触滑块；接近车顶时速度变缓，可保证降落到落弓位时不会对车顶产生过大冲击。通过改变节流阀口的大小，调节快排阀弹簧的压缩量，可以控制快排时间的长短，从而调整降弓时间。

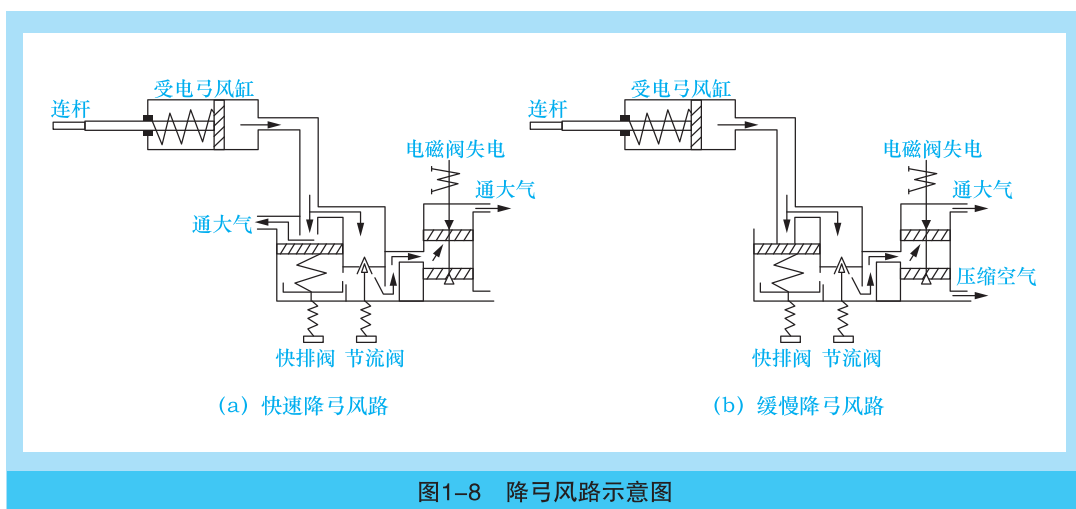


图1-8 降弓风路示意图

(3) 紧急操作。当车辆有压缩空气，但气压不足（低于3 bar，1 bar=10⁵ Pa）时，受电弓也可以手动升弓。此时使用B车车厢设备柜中的脚踏泵，同时手动或电动控制电磁阀开通风路，人工踩压脚踏泵打风，至风压足以升起受电弓为止。

4. 受电弓的主要技术参数

受电弓的主要技术参数有电气参数、机械参数及几何尺寸参数。受电弓的主要技术参数示例见表1-1。

表1-1 受电弓的主要技术参数示例

额定电压/V	DC1500	带绝缘子的高度/mm	300 (折叠高度300+10)
电压范围/V	DC1000~1800	最小/最大工作高度/mm	175 (463) /1600 (2190)
额定电流/A	DC1050	最大升起高度/mm	1700
最大起动电流 (30s) /A	DC1600	碳滑板长度/mm	800 (1050)
最大停车电流/A	DC460	弓头宽度/mm	1550
标准静接触压力/N	120 ± 10	升弓/降弓时间/s	升弓 ≤ 8, 降弓 ≤ 7
静压力调节范围/N	100~140	绝缘性能	交流50 Hz, 5.75 kV干闪络电压1 min 交流50 Hz, 4.75 kV湿闪络电压1 min
滑板单向运动在工作高度范围内压力差/N	≤ 10		
滑板在工作高度范围内同一高度上, 升与降的压力差/N	≤ 15		
运行速度/(km/h)	≤ 90	机械寿命	15 × 10 ³ 次
传动装置压力/kPa	额定550, 最小300, 最大800	受电弓总质量 (绝缘子除外) /kg	200



视野拓展

受电弓的调试

受电弓的调试, 主要包括弓头的静态接触力、升弓时间与降弓时间三项工作。为保证牵引电流的顺利流通, 受电弓和接触网导线之间必须保持一定的接触压力。弓网实际接触压力由四部分组成:

(1) 受电弓升弓系统施加于滑板, 使之向上的垂直力为静态接触压力 (一般为70 N或90 N)。

(2) 由于接触悬架本身存在弹性差异, 接触线在受电弓抬升作用下会产生不同程度的上升, 从而使受电弓在运行中产生上下振动, 使受电弓产生一个上下交变的动态接触压力。

(3) 受电弓在运行中受空气气流作用产生的一个随速度增加而迅速增加的气动力。

(4) 受电弓各关节在升降弓过程中产生的阻尼力。

1. 静态接触压力及最低位置支持力的调整方法

随着列车长时间的运行, 特别是强烈季节性的气温变化之后, 静态接触压力及

最低位置的支持力会随之改变，在每次更换碳滑板之后都需要进行静态接触压力的校正，其测量方法如下。

1) 静态接触压力的测量方法

数值1：测量接触压力从最高工作位置缓缓降弓到最低位置时，在最高位置处的压力。

数值2：测量接触压力从最低位置缓缓升弓到最高工作位置时，在最低位置处的压力。

两个数值的平均值就是静态接触压力。此力要求在 $120\text{ N} (\pm 10\text{ N})$ ，若不符合此要求，就需要进行调整。

2) 调整方法

将弹簧锁紧螺母1松开，然后调整2，直到静态接触力和最低位置支持力都符合要求为止。调整过程中需要将弹簧抱住，防止扭曲，如图1-9所示。

2. 受电弓升降弓时间调整

用秒表检查受电弓升到最高位所需的时间，如果升弓/降弓时间符合默认值（7~8s），则不需要进一步调整；如果测量值不符合要求，则需进行调整。

1) 调节升弓时间

如图1-10所示，松开锁紧螺母2，通过调节螺钉1来调整升弓时间：顺时针方向旋转，可减小空气进入汽缸的速度，从而减小升弓速度；逆时针方向旋转，可增加空气进入汽缸的速度，从而增加升弓速度。调节完毕，固定好锁紧螺母2。

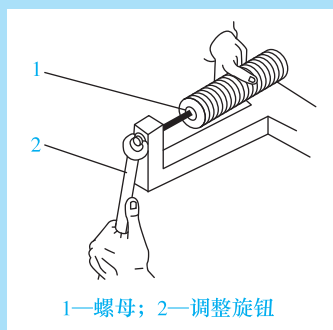


图1-9 受电弓静态接触压力调整

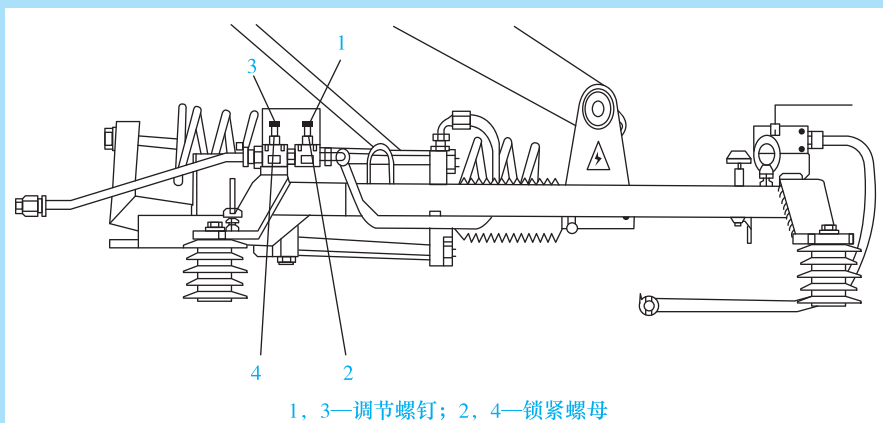


图1-10 受电弓升降弓时间调整

2) 调节降弓时间

松开锁紧螺母4, 通过调节螺钉3进行降弓时间调整: 顺时针方向旋转, 可减小空气的流量, 从而减小降弓速度; 逆时针方向旋转, 可增加空气的流量, 从而增大降弓速度。调节完毕, 恢复锁紧螺母4。

小贴士

流量: 在规定期间内通过一指定点的车辆或行人数量, 在网络指在一定时间内打开网站地址的人气访问量, 或指手机移动数据。

(二) 高速断路器 (HSCB)

HSCB安装在含有受流装置车辆的底部高压箱内。以庞巴迪公司生产的A型车为例, 其HSCB安装在B车的PH箱内, 每辆动车配置一个, 正常状态下通、断车辆主电路 (DC1500V电路), 在车辆发生故障时执行保护指令, 切断动力电源。因此HSCB既是主电路的总电源开关, 也是总保护开关。

1. HSCB的主要性能指标

衡量HSCB性能的主要指标有两个: 机械响应时间和分断能力。

(1) 机械响应时间是指从通过断路器的电流达到动作值, 到主触头打开的时间, 用 T_m 表示。机械响应时间 (T_m) 是电流增长率 (di/dt) 的函数, 如图1-11所示。例如, 当 $di/dt=2 \times 10^7$ A/s时, 机械响应时间为3 ms。显然电流增长率越大, 机械响应时间越短。

(2) 分断能力可用图1-12所示的高速断路器开断过程的电流、电压波形来说明。在相同的短路稳态电流情况下, 开断电压 \hat{U}_d 越高, 电流增长率 di/dt 越大, 则开断电流 \hat{i}_d 越大, 限制时间 T_l 越短, 总开断时间 T_{ov} 越短。

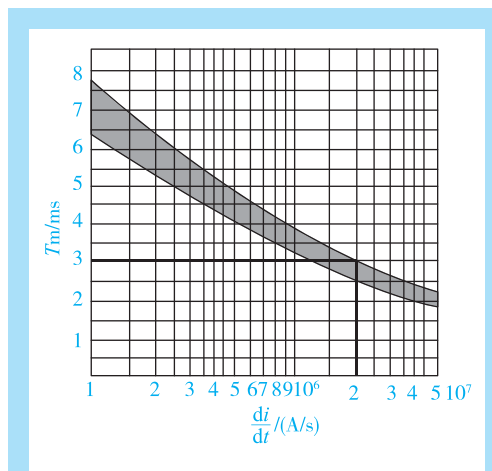


图1-11 高速断路器机械响应时间与电流增长率关系

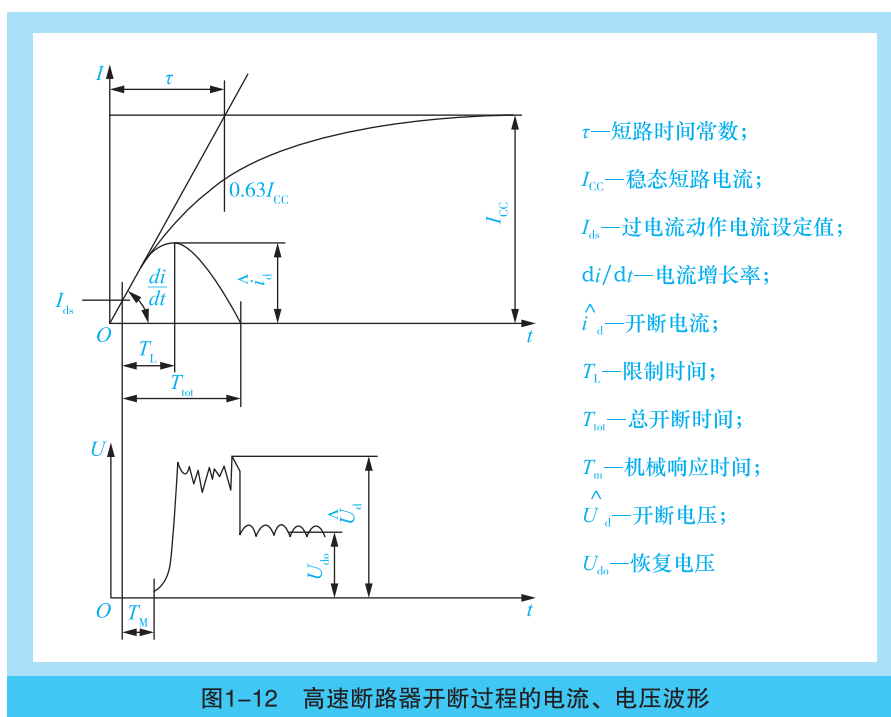


图1-12 高速断路器开断过程的电流、电压波形

2. HSCB的主要特点

(1) 对地有很高的绝缘等级。由于高速断路器正常接在车辆的牵引主电路上，电压高、电流大，因此其绝缘结构应选取有很高绝缘等级的材料。

(2) 分断能力强，响应时间短。高速断路器既是电路的总电源开关也是总保护开关。为有效、可靠地保护其他用电设备，高速断路器必须动作迅速、可靠，并具有足够的断流容量。它的限流特性和高速切断能力能防止由于短路或过载而引起的用电设备毁坏。

(3) 不受气候条件的影响。高速断路器集成安装于箱中的主要优点是可以节省车下空间，并且使HSCB与外界环境隔离。

(4) 使用寿命长。

(5) 易于维护。

3. HSCB的结构

现以上海地铁1号线地铁车辆用高速断路器为例进行结构与工作原理分析。上海地铁1号线使用的是TSE1250-B-I型高速断路器，它是一种电磁控制自然冷却的单极直流断路器，安装在B车上。

TSE1250-B-I型高速断路器包括基架、短路快速跳闸装置(KS)、过载跳闸装置(S型)、合闸装置和灭弧栅。

高速断路器的主要构件有：触头系统、灭弧机构、传动机构、自由脱扣机构、最大电流释入器、最小电压释入器和辅助开关。

(1) 触头系统。动、静触头采用双极串联形式，触头的接触形式采用线接触，接触面大，磨损较小，制造方便。触头制成单独零件，便于更换。

(2) 灭弧机构。采用串封闭式导弧角。

(3) 传动机构。用来操纵主触头闭合。传动形式有手动传动和电磁机构传动。

(4) 自由脱扣机构。位于传动机构与主触头之间，用来保证当电路发生短路时，传动机构还能起作用，高速开关能够可靠地开断电路。

(5) 最大电流释入器。即过载时通过拉杆作用于自由脱扣机构而开断，短路时直接撞击锁钩开断电路。

(6) 最小电压释入器。通过电磁机构作用，衔铁直接作用在锁钩上，使锁钩释放，主触头在开断弹簧作用下开断电路。最低电压为DC77V。

(7) 辅助开关。用于联锁、指示、控制。

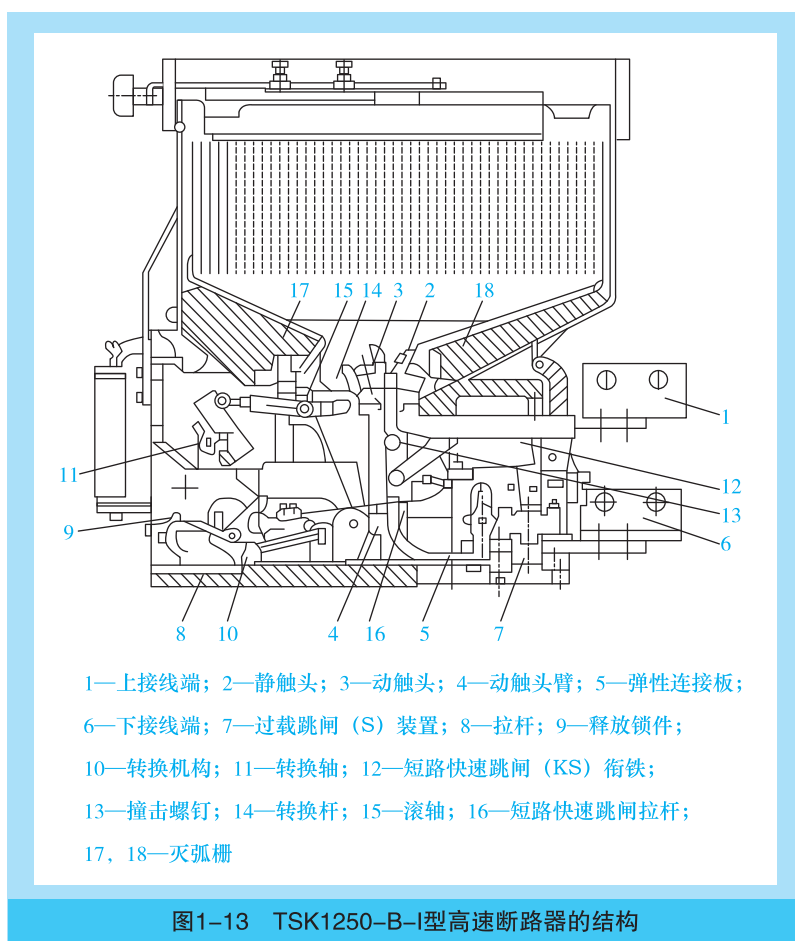
4. HSCB的工作原理

高速断路器的通断由高速断路器按钮控制。按下高速断路器按钮，列车控制线路工作，断路器线圈得电工作，带动机械锁位装置动作，高速断路器置“合”位并保持不变。分断时，欠电压脱扣装置动作，高速断路器分断。高速断路器每极有一个带有固定脱扣整定机构的短路快速跳闸“KS”。另外，每设置一个过载跳闸“S”，其跳闸值均可通过刻度盘来调整。

如图1-13所示，当高速断路器合上以后，电流从上接线端1→静触头2→动触头3→动触头臂4→弹性连接板5→下接线端6，产生过载跳闸(S)装置7的磁场。当电流值超过其整定值时，该装置动作，通过拉杆8→释放锁件9→转换机构10，转换轴11转至“分”位，同时带动动触头臂4，使触头分断。

在短路故障情况下，过载跳闸系统动作慢。短路快速跳闸(KS)衔铁12首先动作，通过撞击螺钉13，直接撞击动触头臂4，由转换杆14和滚轴15之间的专用压紧装置迫使动触头快速分断。由于KS跳闸装置的作用，操纵短路快速跳闸拉杆16，转换机构解锁，转换轴11转至“分”位，同时带动动触头臂4。

触头分断产生的电弧由电磁系统吸入灭弧栅内进行分割、冷却。此外高速断路器合闸线圈设计为短时工作制，其线圈只能短时通电（到合闸位靠机械联锁），断路器触头闭合后线圈不再通电，断路器分断之后再次合闸要求时隔2 min以上。



5. HSCB的参数举例

高速断路器参数示例见表1-2。

表1-2 高速断路器参数示例

额定电压/V	1500 (1+20%)	KS释放的分断时间/(kA/ms)	$di/dt \geq 3$
额定电流/A	1250	机械响应时间/ms	2
短时允许电流/A	1400 (2 h)	机械寿命	20000次
	2000 (2 min)	控制电压/V	DC110
	3000 (20 s)	电寿命	1000次
额定分断能力/kA	35	分断频率(1 h)	30次

(三) 主接触器

接触器按通断电路电流的种类可分为直流接触器和交流接触器；按主触头数目可分为单极接触器（只有一对主触头）和多极接触器（有两对以上主触头）；按传动方式可分为电空接触器和电磁接触器等。城市轨道交通车辆的主接触器是一种用来频繁地接通和切断主

电路的自动切换电器，它的特点是能进行远距离自动控制，操作频率较高，通断电流较大。

现以上海地铁1号线电动车辆BMS.15.06型单极直流电磁接触器为例，说明其工作原理及结构。

1. 电磁接触器的结构组成

电磁接触器一般由电磁机构、主触头、灭弧装置、辅助触头、支架和固定装置等组成。电磁机构包括铁芯、带驱动杆的螺旋线圈和盖板。主触头用来通断电路，触头为镀银球面。灭弧装置包括吹弧线圈和带电离栅的灭弧罩，电离栅将进入的电弧分割成一系列短弧，然后使电弧加速冷却，吹弧线圈确保快速且有效地灭弧。直流接触器设计为模块结构，外壳材料阻燃、无毒、无环境污染。

2. 电磁接触器的工作原理

接触器的电磁线圈未通电时，衔铁在弹簧力作用下保持在释放位置。当电磁线圈得电后，铁芯在电磁力作用下带动驱动杆克服弹簧力而运动。动触头在驱动杆带动下，触头上部与静触头点接触。随着驱动杆继续运动，动静触头间的压力不断增加，动触头在静触头上边滚动边滑动，进行研磨，一直到电磁力与弹簧力平衡为止。此时动静触头的接触点移到触头下部，完成触头闭合，主接触器进入工作状态。同时辅助触头依靠驱动凹轮，实现同步打开或闭合。

触头断开的过程则相反，失电后，电磁力减小，反力弹簧起作用，主触头分断，同时辅助触头的状态也相应变化。

主触头闭合时的研磨过程是将其表面的氧化物或脏物擦掉，以减小接触电阻。触头断开的弹簧力可使触头分断时所产生的电弧不致损坏正常接触点。通常弹簧采用圆柱螺旋弹簧。圆柱螺旋弹簧分为拉伸弹簧和压缩弹簧两种，BMS.15.06型直流电磁接触器采用的是压缩弹簧。

3. BMS.15.06型直流电磁接触器的技术参数

BMS.15.06型直流电磁接触器的主要技术参数见表1-3。

表1-3 BMS.15.06型直流电磁接触器主要技术参数

额定电压/V	DC1500	闭合时间/ms	约100
最大工作电压/V	DC1800	开断时间/ms	约75
额定绝缘电压/V	DC1500	机械寿命	3 × 10 ⁶ 次
额定电流/A	600	电寿命	104次
小时电流/A	630	触头压力/N	54~72
短时电流(5 s)/A	800	控制电源/V	DC110
最大分断电流(15 ms)/A	2400	控制功率/W	30

(四) 线路滤波器

线路滤波器包括线路滤波电抗器和线路滤波电容器，安装于主电路牵引变流器中。

1. 线路滤波器的作用

- (1) 滤平输入电压。
- (2) 抑制电网侧发生的过电压，减少其对逆变器的影响，如变电所操作过电压、大气雷击过电压等。
- (3) 抑制逆变器因换流引起的尖峰过电压。
- (4) 抑制电网侧传输到逆变器直流环节的谐波电流，抑制逆变器产生的谐波电流对电网的影响。
- (5) 限制变流器的故障电流。

2. 线路滤波电抗器

线路滤波电抗器与线路滤波电容器构成谐振电路，用于变流器直流环节。

为保证在任何电流值时电感均恒定，电抗器采用空心线圈结构。不同生产厂家电抗器的电感量选值不同，需与线路电容器的电容量相匹配。谐振频率按 $f=1/(2\pi\sqrt{LC})$ 计算，要求谐振频率与信号系统的调制频率有一定的差值，以免对信号系统产生影响，造成混乱。

对于网压为DC1500 V，逆变器容量在1000 kV·A以上的系统来说，电感量一般为5~8 mH。

3. 线路滤波电容器

线路滤波电容器是一种非常特殊的直流电容器。从功能上看，由于它用于逆变系统的直流环节，因此称作“支撑电容器”；从性质上看，由于要求它能承受很大的谐波电流，因此称作“直流脉冲电容器”。

支撑电容器系列产品的主要参数示例见表1-4。

表1-4 支撑电容器系列产品主要参数示例

最大电流 I_{\max}/A	600	最大浪涌电流 \hat{C}_s/kA	100
额定电压 U_N/kV	6	端子间直流试验电压 U_{TT}/kV	$1.5U_N (10s)$
自感 L_{self}/nH	≤ 40		
额定能量 W_N/kJ	18	端子对外壳交流试验电压 U_{TC}/V	$2U_i+1000 (50Hz, 10s)$ (U_i 为绝缘电压)
介质损耗因数 $\tan\delta_0$	2×10^{-4}		
最大峰值电流 \hat{I}/kA	10	自放电时间常数 $R_s C/s$	≥ 10000

单台电容器的电容量与额定电压 U_N 有关， U_N 越低，电容量可以做得越大。对应于不同的额定电压，电容量可从数百微法到数千微法甚至上万微法。

小贴士

电容：亦称作“电容量”，是指在给定电位差下的电荷储藏量，记为C，国际单位是法拉（F）。一般来说，电荷在电场中会受力而移动，当导体之间有了介质，则阻碍了电荷移动而使得电荷累积在导体上，造成电荷的累积储存，储存的电荷量则称为电容。

（五）制动电阻器

电阻制动时，制动电阻吸收惯性转动产生的电动机发电能量，将电能转换为热能散逸到大气中去。制动电阻箱悬挂安装于车辆底架下方。风扇通过栅格过滤吸入空气，冷却制动电阻。绝缘板给不同电阻提供绝缘。热量显示盒和压力开关组成的热量监视系统用来控制制动电阻温度。制动电阻器结构如图1-14所示。

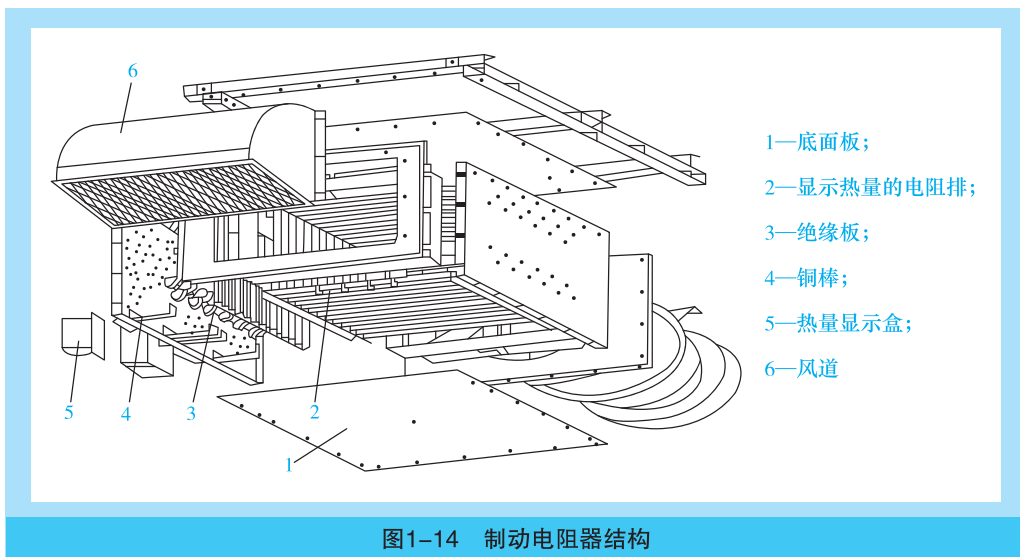


图1-14 制动电阻器结构

制动电阻应有充分的容量，用来承受持续制动下100%的制动负载，直到制动力矩升到极限。带状电阻流过制动电流转化为热能，以发热的方式传递出去。根据这一原理，制动电阻除要求有良好的热容量、耐振动外，还要求能防腐蚀，在高温下不生成氧化层，并特别要注意在正常使用周期内不断裂。

制动电阻器的主要技术参数包括：

- （1）电阻值20℃时的阻值与热态时的阻值。
- （2）电阻材料材质及温度系数。
- （3）功率等效持续功率与短时最大功率。
- （4）最高工作温度一般为600℃左右。
- （5）冷却方式多数采用强迫风冷，少数采用自然风冷（列车走行风）。

(6) 保护形式过热、过电流、失风(若用强迫风冷)保护, IP等级(电阻箱外观保护等级)。

制动电阻器(某公司A型车, 网压DC1500V, 4M2T编组)主要技术参数举例见表1-5。

表1-5 某制动电阻器主要技术参数

20℃时的电阻值/ Ω	2×3.0	冷却方法	强迫风冷
热态电阻/ Ω	2×3.5	风量/(m^3/s)	1.2
材料	AISI310S(不锈钢)	风压/Pa	300
短时功率/kW	2×750	风机功率/kW	1.2(AC380V, 50Hz)
等效持续功率/kW	2×220	最高工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	600(电阻带处)



视野拓展

走行风冷制动电阻箱的日常维护

走行风冷制动电阻箱的维护, 应经常检查出风口及进风口有无异物, 有条件的情况下检查电阻上是否有异物, 并用真空吸尘器清洁。走行风冷制动电阻箱外形如图1-15所示。

1. 检修工艺流程

(1) 检查箱体内外清洁无异状, 安装牢固。

(2) 检查构架无变形、伤痕、裂纹、锈蚀。

(3) 检查罩板无永久弹性变形、伤痕、锈蚀。

(4) 电阻带无变形、破损、锈蚀。若片间距离小于4mm, 则需更换电阻带。

更换方法:

①从母线接线端子上断开主电路电缆。

②从接地螺柱上断开接地电缆端子。

③将车体电缆重新安装到母线接线端子。

④将接地电缆重新安装到接地端子。

⑤检查绝缘体无变形、损伤、裂纹。

⑥电阻值应符合要求。 $\text{OVR}_e(20^{\circ}\text{C})=0.4551\Omega$, 超过额定阻值允差-5%~+7%时需更换电阻带。

⑦检查端子螺栓紧固, 无变形、腐蚀、熔损、变色、裂纹, 线缆无老化、破损。

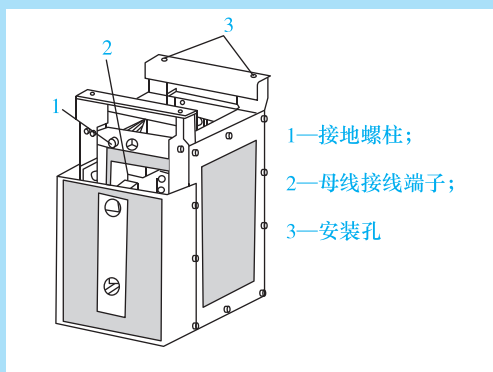


图1-15 走行风冷制动电阻箱

⑧绝缘电阻值应符合要求。用2.5 kV兆欧表测量电阻元件与构架之间的绝缘电阻值不小于10 MΩ。

2. 操作注意事项

(1) 检查维护前必须遵守以下安全措施：

- ①切断电源。
- ②确保不再被合闸。
- ③检查电器设备，确保无电。
- ④接地短路。
- ⑤防止活动物体接近。

(2) 必须遵守有关规定，防止列车意外移动。

(3) 在开始任何工作前，切断牵引逆变器的供电开关以隔离制动电阻，并确保制动电阻温度降到环境温度。

(4) 在制动电阻的风机上开始任何工作前，切断辅助逆变器的供电。

(5) 在温度保护装置及风压开关上开始任何工作前，断开牵引逆变器的供电。

(六) 平波电抗器

平波电抗器是一个带铁芯的大电感。根据电感组件隔交通直的性质以及电路的楞次定律，在牵引电动机支路串联平波电抗器后，当脉动电流流过时，平波电抗器将产生自感电动势 $(e=-L\frac{di}{dt})$ 阻止电流的变化，因而可以起到减小、抚平电流脉动的作用。

电感 L_d 与整流 I_d 的关系为 $L_d=f(I_d)$ 。

试验表明，具有铁芯的电抗器可使 $I_d L_d$ 的乘积近似为常数，这样便使电流脉动系数近似不变，其特性曲线如图1-16中曲线2。图中表明在小负载时，铁芯磁路不饱和， L_d 值较大；当负载增加时，随着铁芯磁路的饱和， L_d 值逐渐减小。

平波电抗器的电感值 L_d 取得越大，电流脉动程度将越小，这对牵引电动机的工作非常有利，但平波电抗器本身的尺寸和质量也必然增大。这不仅影响车辆设备的总体布置，而且整流电流的脉动越小波形越平直，变压器一次侧电流畸变越严重，其谐波分量也相应增加，对供电系统的影响和对通信的干扰就更大，因此对平波电抗器的选择应有一个合适范围。通常是在一定的整流电压下，先规定好整流电流的脉动系数，然后计算出不同负载下对应的电感

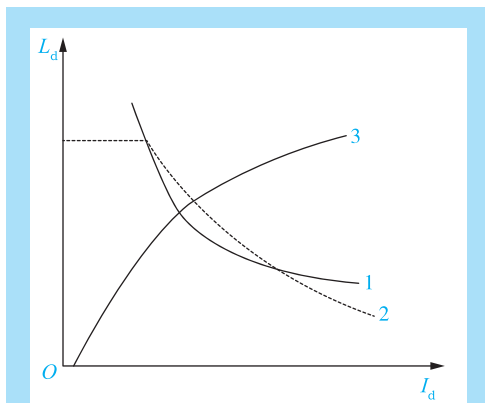


图1-16 平波电抗器特性曲线

值，再选用合适的平波电抗器。

（七）浪涌电压吸收器（避雷器）

浪涌电压吸收器用于防止来自城市轨道交通车辆外部的过电压（如雷击等）对车辆电气设备的破坏。浪涌电压吸收器与被保护物并联，当出现危及保护物绝缘板的过电压时放电，从而限制绝缘板上的过电压值，它的保护范围应与变电所过电压保护相配合。

1. 结构原理

浪涌电压吸收器安装于B车车顶的受电弓侧。它包括一个火花间隙和一个非线性电阻，两部分装配于一个陶瓷壳内，用法兰盘密封。外壳用硅橡胶材料或其他抗紫外线、不分解的绝缘材料制成。

在正常电压下火花间隙处于不通状态，当出现大气过电压时，发生击穿放电。当过电压达到规定值的动作电压时，浪涌电压吸收器立即动作，切断过电压负荷，将过电压限制在一定水平，保护设备绝缘。当过电压终止后，浪涌电压吸收器迅速恢复不通状态，恢复正常工作。

击穿电压的幅值同击穿时间的关系曲线称为伏秒特性。显然，要可靠地保护用电设备，浪涌电压吸收器的伏秒特性应比被保护绝缘板的伏秒特性低，即在同一过电压作用下避雷器先击穿。

非线性电阻（氧化锌）是一种非线性电阻器，它的电阻值随电阻器两端的电压变化而变化，一般称为压敏电阻器，具有理想的伏安特性（相当于稳压二极管的反向特性）。它在正常工作状态下呈高阻，流过的电流非常小，可视为绝缘体。当系统出现超过电压动作值的电压时，电阻呈低阻，流过的电流急剧增大，此时电流的增大抑制了电压的上升，使浪涌电压吸收器的残压被限制在允许值内，并将冲击电流迅速泄入地下，从而保护了与其并联的设备，避免绝缘击穿。当电压恢复到正常工作范围时，电阻呈高阻，避雷器又呈绝缘状态。

2. 浪涌电压吸收器的主要技术参数

- （1）额定冲击释放电流、冲击电流、持续释放电流、短路电流。
- （2）阈值电压、冲击释放电压、直流放电电压。
- （3）爬电距离、放电距离。
- （4）特性曲线。

3. 浪涌电压吸收器主要技术参数举例

某A型车，网压DC1500V的浪涌电压吸收器的主要技术参数见表1-6。

表1-6 浪涌电压吸收器主要技术参数

标称电压/V	DC1500	短路电流/kA	20
最大电压/V	DC2000	阈值电压/kV	7.1
额定冲击释放电流/kA	10	爬电距离/mm	165
冲击电流/kA	100		

（八）接地装置

1. 接地装置的功能

接地装置的主要作用是为主电路提供回流通路，使电流经轮对到达钢轨，构成DC1500V完整的电路，同时防止电流通过轴承造成轴承内润滑油层的电腐蚀，以提高轴承的使用寿命。

2. 接地装置的安装

接地装置安装于转向架的轮对轴端，A车转向架第2轴的右侧和第3轴左侧轴端各安装一个；B车和C车转向架第1、3轴的左侧轴端各安装一个，在第2、4轴的右侧轴端各安装一个（A、B、C车见图1-5）。

3. 接地装置的外形与结构

城市轨道交通车辆接地装置主要由接触盘、电刷架、弹簧支撑组成，其外形及内部结构如图1-17所示。

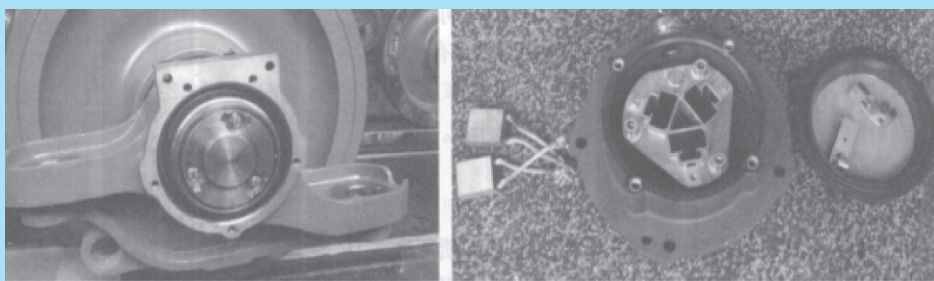


图1-17 接地装置的外形及内部结构

二、控制电路电器

城市轨道交通车辆控制电路电器主要包括驾驶控制器装置、牵引控制系统电器和列车自动控制系统电器等。下面主要介绍驾驶控制器、速度传感器、继电器等电器件。

（一）驾驶控制器

城轨车辆驾驶控制器为凸轮触点式控制器，其结构组成如图1-18所示，有主控制手柄、方式/方向手柄、主控器钥匙、转换开关组、凸轮组、警惕开关等，面板操作部分有主控制手柄、方式/方向手柄、主控器钥匙。

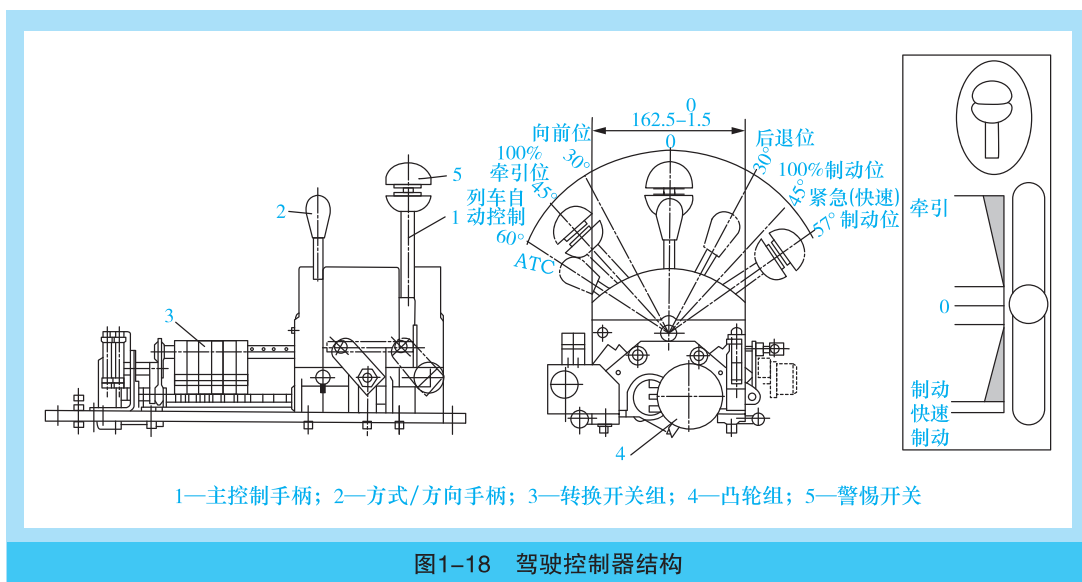


图1-18 驾驶控制器结构

1. 主控制手柄

主控制手柄有“0”位、“牵引”位、“制动”位、“紧急制动”位四个位置。

“0”位——机械零位。

“牵引”位——向前推动手柄（远离驾驶员），牵引给定值可无级输入，最前端位置为“100%牵引位”。

“制动”位——向内拉动手柄（拉向驾驶员），制动给定值可无级输入，在“100%制动位”有一阻滞，最里端位置为“紧急（快速）制动位”，快速制动位带有限位凹槽。

2. 方式/方向手柄

方式/方向手柄用于选择驾驶方向。它有“向前”“0”“后退”三个位置。运行方向必须在车辆运行前选择，并且到下一站前停车保持有效。

“向前”位——通过系统操作或手动控制向前运行。在制动位上通过操作主控制手柄，可摆脱ATC的指令进行制动。

“0”位——没有驾驶模式时被激活。

“后退”位——人工倒车模式。

方式/方向手柄与主控制手柄间存在机械联锁。只有当主控制手柄在“0”位时，方式/方向手柄才能进行向前或向后位置转换。只有选择好方向，即方式/方向手柄在非“0”位时，主控制手柄才可进行牵引或制动操作。一旦方式/方向手柄在非允许情况下改变了方向手柄的位置，则系统自动起动紧急制动。

3. 主控器钥匙

主控器钥匙用于激活驾驶台，位于驾驶控制器的右上角，有0、1两个位置。

“0”位——关闭位置，只能在此位置取出或插入钥匙。主控器钥匙置于“0”位时，主控器手柄和方式/方向手柄均被锁死，不能对其进行操作且都处于“0”位。

“1”位——激活驾驶台。驾驶员可进一步操作其他开关激活车辆。一旦主控制手柄和方式/方向手柄处于非“0”位，则主控器钥匙就会被锁死不能回“0”位。只有当主控制手柄和方式/方向手柄处于双“0”位时，主控器钥匙开关才能从“1”位移回“0”位。

4. 警惕开关

警惕开关是位于主控制手柄上端的两个半圆头开关。正常工作时，驾驶员必须用大拇指将两个半圆合拢，只有停车时才放开。人工驾驶时只有按下警惕开关，操纵主控制手柄，列车才能起动。若松开警惕开关3 s（在弹簧作用下两个半圆头分开），列车立即进入紧急制动状态。

5. 电位器

在主控制手柄底部连接一电位器，当主控制手柄由“0”位移向“牵引”或“制动”位时，输出0~20 mA电流的驾驶员指令给控制电路。



视野拓展

司机控制器的日常维护

1. 司机控制器检修与维护时的工作内容

- (1) 司机控制器的铭牌及标识符号应齐全、完整、清晰与正确。
- (2) 司机控制器各部件应清扫干净，绝缘性能良好，对外连接插座连接正确，零部件齐全完整。
- (3) 各紧固件齐全，紧固状态良好。
- (4) 控制手柄在各个挡位之间应转动灵活，无机械卡阻，相邻两挡位之间不应出现停滞现象。
- (5) 换向手柄在各个挡位之间应转动灵活，无机械卡阻，相邻两挡位之间不应出现停滞现象。
- (6) 司机控制器控制、换向手柄之间的联锁关系应正确无误。
- (7) 司机控制器的闭合表和对外连接线应与规定相一致。在司机控制器线束内有一根备用线（不带线号，头部折弯）。
- (8) 在司机控制器的各个转动部位加注6号汽油机油，在机械联锁处加润滑脂。

2. 司机控制器的绝缘要求

- (1) 相互绝缘的带电部分之间及对地的绝缘电阻不小于10 M Ω （用500 V兆欧表）。

视野拓展

(2) 检修后应进行绝缘介电强度试验。司机控制器带电部分对地及相互间施以 50 Hz、1100 V、正弦波交流电 1 min，应无击穿、闪络现象。

3. 司机控制器触头的检修要求

(1) 司机控制器日常检修时，应注意检查触头内部及滚轮架（包括滚轮滚动）的动作是否灵活可靠；如不灵活，应在触头滚轮轴芯及滚轮架轴芯部分加少许 6 号汽油机油，以增加触头动作的灵活性。

(2) 司机控制器使用的触头为自净式速动开关元件，均为免维修型。如确有严重烧损和动作不灵活者，应更换该触头。更换时，注意触头型号和触头滚轮的安装方向。

(3) 应定期检测触头的接触电阻，采用低电阻测试仪（如固纬 GOM-801G）测量，测量电流不小于 1 A，触头的接触电阻应小于 500 mΩ。

4. 若是由于机械原因造成的故障，需要对司机控制器进行拆卸时的注意要点

(1) 司机控制器的控制凸轮组件和换向凸轮组件有机械连锁关系，在拆装时，应注意做好标记，必须按照闭合表进行。

(2) 控制侧和换向侧的弹片组件安装的倾斜程度，可调整控制手柄和换向手柄的操作力大小，在保证司机控制器动作可靠的情况下，两手柄操纵轻便、灵活。

(3) 控制侧和换向侧的凸轮是产品出厂前整定好的组件，在拆装时请不要随意拆开。

(4) 为了保证司机控制器对外的连接无误，在检修、拆装时，应注意司机控制器对外连接。

（二）速度传感器

传感器是一种测量装置，它能感受相应的被测量，并按照一定规律转换成可用输出量（电量），以满足信息的传输、处理、储存、记录、显示和控制要求。

微电子技术和微处理技术的发展，使传感器出现了新的突破，从实时处理发展到信息储存、数据处理和控制。近年来，传感器在智能方面取得了较大的进展。随着轨道交通车辆的控制系統越来越复杂，自动化的程度也越来越高。为了满足控制系统的功能要求，需要检测有关部件、系统或整车的有关量，如温度、压力、应力、力矩、转速、加速度、风速、空气流量、真空度、振动以及噪声等。因此，传感器在轨道交通车辆上得到了广泛的应用。

速度传感器安装于车辆轮轴上，它提供控制系统信号的选取、转换和传输。安装于城市轨道交通车辆上的速度传感器要求性能可靠、精度高、抗干扰性强。

上海地铁 1 号线电动车辆使用的速度传感器分为单信道速度传感器和双信道速度传感

器两种，型号分别为GID-E和GID5，它们在电动车辆上的布置如图1-19所示。

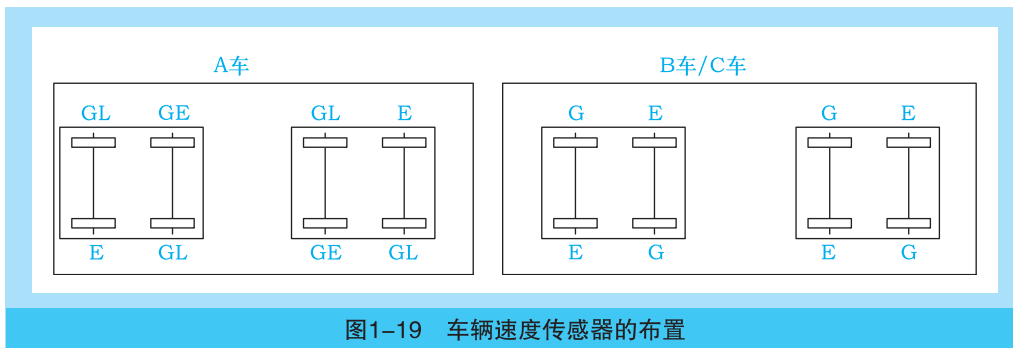


图1-19 车辆速度传感器的布置

电动列车A车上速度传感器的分布情况为：每根轮轴装有一只单通道传感器，为空气制动的滑行保护系统提供速度信号。GE为ATC系统速度传感器，GL为防滑速度传感器，E为接地装置。电动列车B车、C车上速度传感器的分布情况是：每根轮轴装有一只双通道传感器，分别为牵引和电制动系统的空转与滑行保护系统及空气制动的滑行保护系统提供速度信号。E为接地装置，G为防空转防滑行速度传感器。

1. 速度传感器的结构与工作原理

磁电式传感器主要用于城市轨道交通车辆的速度检测。传感器的原理如图1-19所示。磁电式传感器的基本原理是利用电磁感应原理，将输入机械位移转换成线圈中的感应电动势输出，它不需要外加电源。

永久磁铁、感应线圈和外壳固定不动，齿轮安装在轮对轴端随轮轴一起旋转。当齿轮随轮轴旋转时，齿轮与软磁铁轭之间的气隙随之变化，从而导致气隙磁阻和穿过气隙的主磁通变化，在线圈中感应出电动势。设每转一圈传感器发出110个脉冲，其频率为

$$f = \frac{nN}{60} \quad (\text{Hz}) \quad (1-1)$$

式中： n ——转速，单位为r/min；

N ——齿数， $N=110$ 。

脉冲速度信号经脉冲整形放大后输出整齐的矩形波信号，并将此信号送到计数器，把频率转换成转速。

速度传感器主要包括脉冲发生器、磁轮、密封件和外盖。速度传感器的磁轮使用螺钉固定在轴箱端盖上。带有电缆接线的脉冲发生器安装在速度传感器的盖上，脉冲发生器与磁轮之间存在小气隙，要求气隙范围在0.4~1.4 mm之间。

2. 速度传感器的技术参数

速度传感器的技术参数见表1-7。

表1-7 速度传感器技术参数

工作电压 U_g/V	DC12~20	额定工作电压/V	DC15
信号输出电阻/ $k\Omega$	1	频率范围/kHz	1~5
轴输出电压/V	峰值 $\geq U_B-2.5$, 低值 ≤ 0.6	探头与磁轮间气隙/mm	$0.90 \times (1 \pm 5\%)$
负载电阻/ $k\Omega$	≥ 2.2	工作环境温度/ $^{\circ}C$	-40~80
静态输出电压/V	7 ± 1		

视野拓展

继电器常见故障

1. 触头故障

(1) 由于触头的机械咬合(触头上形成的针状凸起与凹坑相互咬住)、熔焊或冷焊而产生无法断开的现象。

(2) 由于接触电阻变大和不稳定使电路无法正常接通的现象。

(3) 由于负载过大或触头容量过小或负载性质变化等引起触头无法分、合电路的故障。

(4) 由于电压过高或触头开距变小而出现触头间隙重新击穿的故障。

2. 线圈故障

(1) 由于环境温度的变化(超过技术条件规定值)导致线圈温升超过允许值而引起线圈绝缘的损坏;由于潮湿而引起绝缘水平的严重降低;由于腐蚀而引起内部断线或匝间短路。

(2) 由于线圈电压超过110%额定电压而导致线圈损坏。

(3) 在使用维修时,可能由于工具的碰伤而使线圈绝缘损坏或引起线折断。

3. 磁路故障

(1) 棱角和转轴的磨损,导致衔铁转动不灵或卡死的故障。

(2) 在有些直流继电器中,由于机械磨损或非磁性垫片损坏,使衔铁闭合后的最小气隙变小,剩磁过大,导致衔铁不能释放的故障。

4. 其他

如各种零件产生变形或松动,机械损坏,镀层裂开或剥落,各带电部分与外壳间的绝缘不够,反力弹簧因疲劳而失去弹性,各种整定值调整不当,产品已达额定寿命等。

(三) 继电器

继电器是一种根据外界输入信号(电量或非电量)的变化,接通或断开小电流电路,以实现自动控制和保护功能的电器,如图1-20所示。

一般来说，继电器主要用来反映各种控制信号。其触点通常接在控制电路中，不直接控制主电路。与接触器不同，继电器负载较小，不需要灭弧装置，触点种类和数量较多、体积小，但对其动作的准确性要求高。

继电器主要由测量机构和执行机构两部分组成。测量机构接收输入量，并将其转变为继电器工作所必需的物理量，如电压、电流、压力等；执行机构用以改变继电器原来所处状况，并给被控电器一个输入量。

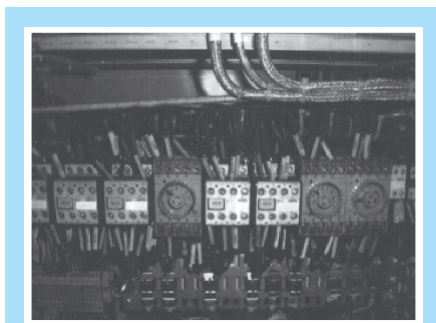


图1-20 电气设备柜中的继电器

继电器的分类方法有很多，按工作原理可分为电磁继电器、感应继电器、热继电器等；按输入信号性质可分为电流继电器、电压继电器、压力继电器等；按输出方式可分为有触点式继电器和无触点式继电器。

1. 结构原理

以电磁式继电器为例，城市轨道交通车辆上应用的电流继电器、中间继电器和电压继电器均属于电磁式继电器。

电磁式继电器的电磁机构就是测量机构，当输入量达到其动作参数要求时，就将转变为衔铁的吸合动作。它的触点是执行结构，当输入量达到动作参数要求时，它由原来的开断状态转变成闭合状态，并接通被其控制的电路，从而得到一个输出电压。

继电器的输入量与输出量的关系称为继电器的输出-输入特性。当输入量由零增加到一定值（动作参数）时，衔铁被吸合，使触点闭合，接通被控电路，在输出端有电压输出，即输出量由零跃变到最大值。衔铁吸合后，如果将输入量减小到一定值（释放参数），反作用力大于电磁吸力，衔铁释放，触头断开，被控电路也断开，输出量由最大值下降到零。当输入量继续减小时，输出量维持为零值。通常动作参数远大于释放参数。继电器输入量的释放参数与动作参数之比称为返回系数 K 。

继电器的触点接在控制电路中，通过电流较小（一般在20 A以下）。其结构多采用板式和桥式的点接触银质触头。如果双断点桥式银质触头焊在弹簧片（磷铜片）上，则弹簧片既作为传导电流的触头支架，又产生触点压力，但主要由圆柱螺旋弹簧产生触点压力。

触点是继电器的执行机构，其工作必须可靠。对继电器触点的主要要求是：耐振动和冲击，不产生误动作；触点接触电阻要小，以便接触可靠；耐机械磨损和电磨损，抗熔焊；使用寿命长等。

2. 技术参数

继电器的主要技术参数有：额定电压、吸合电压、释放电压、吸合时间、释放时间、

线圈消耗功率、触点接触电阻、绝缘电阻、触点负荷和寿命等。

3. 继电器举例

上海地铁1号线车辆主要使用SH系列继电器，见表1-8。

表1-8 SH系列继电器

型号	线圈电压	触点分配	型号	线圈电压	触点分配
SH04.22E	DC110V	二常开、二常闭	SH8.62E	DC110V	六常开、二常闭
SH04.40E	DC110V	四常开	SH8.80E	DC110V	八常开
SH8.44E	DC110V	四常开、四常闭	SH8.53E	DC110V	五常开、三常闭

三、辅助电路电器

城市轨道交通车辆辅助电路电器主要包括空气压缩机装置、照明装置和空调等。这里主要介绍空调装置。

城市轨道交通列车的每个单元，即A、B和C车（A、B、C车见图1-5）车顶上都安装了两个相同的空调装置（A/C，空调控制单元），空调系统的作用就是确保车内有舒适的环境温度和湿度，即使室外的温度和湿度很高时，空调装置也能够给乘客提供充足的新鲜空气。城市轨道交通车辆空调装置一般不能用来取暖。

空调装置把空气吸入到安装在车顶板上部的风道里，空气在风道里按整车长度均匀分配，并通过安装在车顶上的空气隔栅吹入客室。A车除了有客室通风系统，还安装了单独的驾驶室通风单元，驾驶室通风单元与风道系统相连，由人工控制。

新鲜空气通过四个横向的隔栅（新风入口）进入A/C单元（空调控制单元），与从客室来的循环空气混合。循环空气通过空调单元端部的返回入风口进入空调。混合空气经处理后，经空气分配风道强迫进入客室，如图1-21所示。

1. 空调系统结构组成

空调系统结构主要包括2个冷凝盘管、2个轴流风扇电动机（即室外热交换机），它们的作用是将室外风机吸入的新鲜空气经过盘管，实现内部制冷剂的冷凝；2个涡旋式压缩机，其作用是吸入低温的制冷剂，将其压缩为高温高压的制冷剂后送出；2个干燥过滤器，用以吸收制冷剂中的水分，同时过滤制冷剂中的杂质，避免制冷系统出现脏堵现象；1套蒸发器（包括1个带有2个热力膨胀阀的蒸发器盘管、1套风扇及其驱动电动机、1个压力开关、1个供风温度传感器和1个空气过滤器），其作用是将制冷剂与混合空气进行热交换；1个基于微处理器的温度控制器，控制板通过数字输入/输出和MVB总线（多功能车辆总线）与车辆信息系统连接，用来报告故障、起动命令、起动授权和自检检测结果。

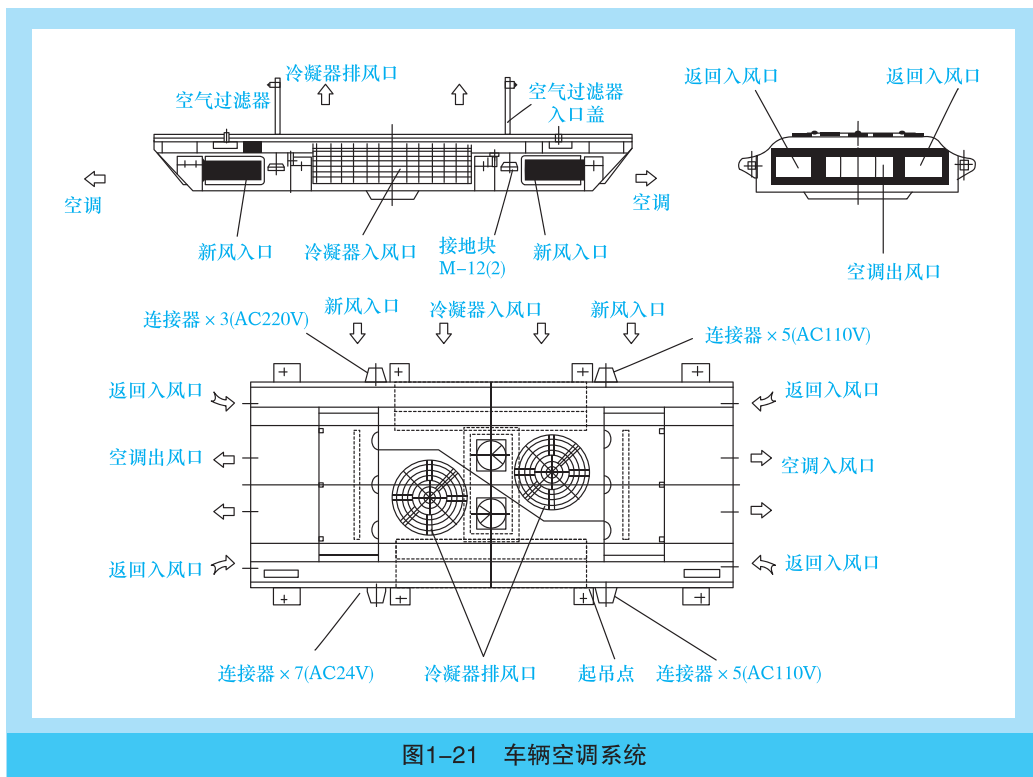


图1-21 车辆空调系统

2. 空调系统的运行模式

空调系统的运行模式有通风（无制冷）、预制冷（只有循环空气）、制冷（一般新鲜空气模式）、制冷（减少新鲜空气模式）、紧急通风（只有新鲜空气）、试验模式等。

通常的运行模式有通风、一般新鲜空气模式制冷和减少新鲜空气模式制冷三种，根据车内温度由温控器自动选择。当空调系统启动时，预制冷模式自动启动，一直保持到发出驾驶指令，在这期间没有新风被送入客室。此时如果车内有乘客，空气中的 CO_2 含量将增加，这会影响乘客的舒适度。当驾驶指令发出时，控制器根据客室温度开始制冷。

制冷模式是将来自客室的循环空气和吸入的新鲜空气混合后，通过相应的空气调节风门进入蒸发器模块，被风扇强迫吹过蒸发器盘管。利用制冷剂使空气热量被翅片吸收，温度下降后，将冷却空气送入客室。

试验模式可以在每辆车的控制板上选择。空调系统一旦启动，就开始系列试验，检查系统是否正常工作。

紧急通风模式是在车载供电系统故障时（例如车载AC380V供电系统故障，空调无法使用），为了保持向客室内提供新鲜空气，将地板下的一个静止逆变器启动，由蓄电池供电，供风风扇工作，同时关闭循环空气盖，只允许外部空气供向车内。

如果由于空调单元的热过载而引起车内温度超出设定值，则要关闭部分空气调节风门以减少外部空气的供应量。

任务三 城市轨道交通车辆运行工况与受力分析

一、城市轨道交通车辆动轮与钢轨的相互作用

目前城市轨道交通车辆运行采用的技术有轮轨技术和直线技术。绝大多数城市轨道交通车辆属于轮轨式，即运行工况依赖于车轮和钢轨的相互作用力。

在轮轨式城市轨道交通车辆中，牵引动力由牵引电动机通过传动机构传递给动车的动力轮对（动轮），由车轮和钢轨的相互作用产生使车辆运动的反作用力。根据物理学中摩擦的概念，轮轨之间的切向作用力就是静摩擦力。最大静摩擦力是钢轨对车轮的反作用力的法向分力与静摩擦因数的乘积。但实际上，动轮与钢轨间切向作用力的最大值比物理学上的最大静摩擦力要小一些，情况也更复杂一些。在分析车辆的轮轨相互作用时，引入了两个十分重要的概念——“粘着”和“蠕滑”。

1. 粘着

图1-22所示为动车以速度 v 在平直线路路上运行时一个动轮对的受力情况（忽略内部各种摩擦阻力）。为了更清楚地表示，图中将接触的动轮与钢轨稍稍分开画出。

P_i 为一个动轮对作用在钢轨上的正压力，又称为轮对的轴重（也称为垂直载荷）。牵引电动机作用在动轮上的驱动转矩 M_i ，可以用一对力形成的力偶代替。力 F_i' 和 F_i 分别作用在轮轴中心的 O 点和和钢轨接触处的 O' 点，其大小为 $F_i = F_i' = M_i/R_i$ ， R_i 为动轮半径。

在正压力 P_i 的作用下，动轮和钢轨的接触部分紧压在一起。切向力 F_i 使动轮上的 O' 点具有向左运动的趋势，并通过 O' 点作用在钢轨上。 f_i' 表示动轮作用在钢轨上的力，其值 $f_i' = F_i$ 。由于轮轨接触处存在着摩擦，动轮上 O' 点向左运动的趋势将引起向右的静摩擦力 f_i ，即钢轨对动轮的反作用力，其值 $f_i = f_i'$ ， f_i 称为轮周牵引力。因此，车轮上的 O' 点受到两个方向相反的力 F_i 和 f_i 的作用，而且

$$f_i = F_i \quad (1-2)$$

所以， O' 点保持相对静止，轮轨之间没有相对滑动，在力 F_i' 的作用下，动轮对作纯滚动运动。

这种由于正压力（垂直载荷）而保持动轮与钢轨接触处相对静止的现象在轨道牵引制

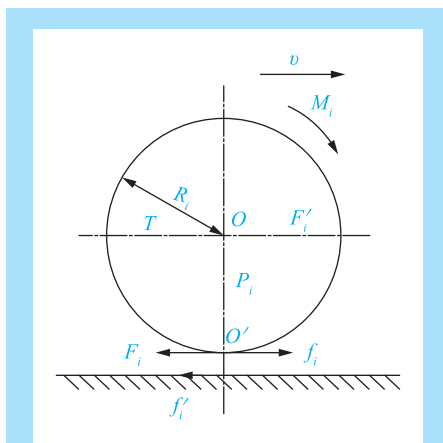


图1-22 动轮对受力分析

动理论中称为“粘着”。相应地，在粘着状态下轮轨间纵向水平作用力的最大值 f_{\max} 就称为粘着力。粘着力 f_{\max} 与轮轨间垂直载荷之比称为粘着系数，用 μ 表示，即

$$f_{\max} = \mu P_i \quad (1-3)$$

轮轨间的粘着与静力学中静摩擦的物理性质十分相似，但比物理上的“最大静摩擦力”要小得多。式(1-3)表明，在轴重一定的条件下，粘着力可以由轮轨间粘着系数决定。因此，为了便于实际应用，假定轮轨间垂直载荷在运行中间固定不变，即粘着力的变化完全是由于粘着系数的变化而引起的，这样，粘着力与运行状态的关系被简化成粘着系数与运行状态的关系。

仍以图1-22为例进行分析，当切向力 F_t 增大时，静摩擦力 f_s 随之增大，并保持与 F_t 大小相等。当切向力 F_t 增大到某一数值时，静摩擦力 f_s 达到最大值。当轮轨间一旦出现切向力 F_t 大于粘着力，动轮上的 O' 将向左移动，轮轨间出现相对滑动，粘着状态被破坏。动轮与钢轨的相对运动由纯滚动变为既有滚动，也有滑动。此时钢轨对动轮的反作用力 f_s 由静摩擦力变为滑动摩擦力，其值迅速减小，并使轮的转速上升。这种因驱动转矩过大，轮轨间的纵向水平作用力超过了维持静摩擦的极限值——最大静摩擦力，使轮轨接触点发生了相对滑动的现象，称为“空转”。空转时，轮轨间只能依靠滑动摩擦力传递切向力，传递切向力的能力大大减弱，即牵引力反而大大降低，同时造成动轮踏面和轨面的剧烈磨耗。如果在列车起动时发生动车动轮“空转”，列车没能起动而驾驶员又没有及时采取措施减小动轮受到的力矩，甚至可能发生把钢轨的轨头磨掉，动轮陷入钢轨凹下的深坑内的严重事故。因此，牵引运行应尽量防止出现动轮的空转。

粘着系数是由轮轨间的物理状态确定的。加大每轴的正压力，即轴重，可以提高每轴牵引力，但轴重受到钢轨、路基、桥梁等限制。动力分散型的城市轨道交通车辆，动轴数较多，很容易达到整列车所需的牵引力，因而轴重较小，这对保护轮轨的正常作用是有利的。

2. 蠕滑

分析牵引工况轮轨接触处的弹性变形（见图1-23），可以进一步深化对粘着的认识。

在动轮正压力的作用下，轮轨接触处产生弹性变形，形成椭圆形的接触面。从微观上看，两接触面是粗糙不平的。由于切向力的作用，动轮在钢轨上滚动时，车轮和钢轨的粗糙接触面产生新弹性变形，接触面间出现微量滑动，即“蠕滑”。

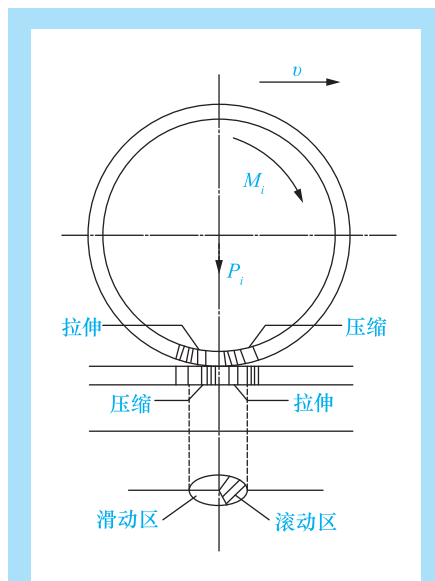


图1-23 牵引工况轮轨接触处的弹性变形

蠕滑的产生是由于在车轮接触面的前部产生压缩，后部产生拉伸；而在钢轨接触面的前部产生拉伸，后部产生压缩。车轮上被压缩的金属，在接触表面的前部与钢轨被拉伸的金属相接触。随着动轮的滚动，车轮上原来被压缩的金属陆续放松，并被拉伸，而钢轨上原来被拉伸的金属陆续被压缩，因而在接触面的后部出现滑动。

轮轨接触面存在两种不同区域：滚动区和滑动区。接触面的前部，轮轨间没有相对滑动，称为滚动区，在图1-23中用阴影线表示；接触面的后部轮轨间有相对滑动，称为滑动区。这两个区域的大小随切向力的变化而变化。当切向力增大时，滑动区面积增大，滚动区面积减小。当切向力增大超过一定程度时，滚动区面积为零，整个接触面间出现相对滑动，轮轨间的粘着被破坏，即出现空转。

蠕滑是滚动体的正常滑动。动轮在滚动过程中必然会产生蠕滑现象。伴随着蠕滑产生静摩擦力，轮轨之间才能传递切向力。由于蠕滑的存在，牵引时动轮的滚动圆周速度将比其前进速度快。这两种速度的差称为蠕滑速度，蠕滑的大小用蠕滑率 σ 表示，即

$$\sigma = \frac{\omega R_1 - v}{v} \quad (1-4)$$

式中： v ——动轮的前进速度；

ω ——动轮转动的角速度。

轮轨间由于摩擦产生的切向力反过来作用于驱动机构，随着切向力的增大，驱动机构内的弹性应力也增大。当切向力达到极限时，由于蠕滑的积累波及整个接触面，发展为真滑动。积累的能量使车轮本身加速，这时驱动机构内的弹性应力被解除。由于车轮的惯性和驱动机构的弹性，在轮轨间出现“滑动→粘着→再滑动→再粘着”的反复振荡过程，一直持续到重新在驱动机构中建立起稳定的弹性应力为止。

3. 粘着系数

粘着系数是一个由多种因素决定的变量。粘着系数与轮荷重、线路刚度、传动装置、走行部结构、车轮与钢轨的材质及表面状态、车速等因素有关。例如，在钢轨上撒上一层细石英砂，粘着系数高达0.6，而一般钢轨粘着系数在0.3~0.5间变化。若轨面有一层薄油膜，则粘着系数下降，甚至可降到0.15以下。若轮荷重不同，轮轨接触面的变形也不同，粘着系数也会随之变化。粘着系数作为物理值具有随机性，变化范围很大，且影响因素很多，所以很难准确计算，一般都是依据经验或试验数据确定。由经验公式计算求得的粘着系数称为计算粘着系数，用 μ_j 表示。

$$\text{欧洲轨道} \quad \mu_j = \frac{7.5}{v+44} + 0.161 \quad (1-5)$$

$$\text{我国轨道} \quad \mu_j = 0.25 + \frac{8}{100+20v} \quad (1-6)$$

例如，将 $v=80$ km/h代入式(1-5)中，得到 $\mu_j \approx 0.22$ ，再代入式(1-6)中，得到 $\mu_j \approx 0.25$ 。

计算粘着系数在正常条件下不需要撒砂就能实现，在恶劣条件下，通过撒砂也能基本实现。但列车在曲线上运行时，由于钢轨超高及内外侧动轮走行距离不同引起的横向和纵向滑动等原因，粘着系数将要减小（即粘降）。当曲线半径 $R < 600$ m时，粘着系数用公式 $\mu_r = \mu_j (0.67 + 0.0005R)$ 计算进行修正。例如 $v = 80$ km/h，粘着系数为 $\mu_j = 0.22$ ，当 $R = 300$ m时，修正后的粘着系数为 $\mu_r = \mu_j (0.67 + 0.0005R) = 0.22 \times (0.67 + 0.0005 \times 300) = 0.1804 \approx 0.18$ 。

随着电力技术的发展，牵引功率越来越大，牵引力和制动力都逐渐增大，轮轨间的粘着已成为限制增大牵引力和制动力的关键问题。

4. 影响粘着系数的主要因素

(1) 动轮踏面与钢轨表面状态。干燥清洁的动轮踏面与钢轨表面粘着系数高；冰、霜、雪等天气的冷凝作用或小雨使轨面轻微潮湿时轨面粘着系数降低；大雨冲刷、雨后生成薄锈使粘着系数增大；油垢使粘着系数减小；在钢轨上撒砂则能较大幅度地提高粘着系数。

(2) 线路质量。钢轨越软或道砟的下沉量越大，粘着系数越小；钢轨不平或直线地段两侧钢轨顶部不在同一水平高度，动轮所处位置的轨面状态不同都会使粘着系数减小。

(3) 车辆运行速度和状态。车辆运行速度的提高，加剧了动轮对钢轨纵向和横向滑动及车辆振动，使粘着系数减小。特别是在轮轨表面被水污染的情况下，粘着系数随速度增大反而急剧下降。

车辆运行中由各种因素导致轴重转移，也影响着粘着系数。车辆驶过弯道、上坡道时，造成车辆车轮内侧（前端）增载，外侧（后端）减载，造成粘着系数大幅度减小，曲线半径越小，粘着系数减小得越多。

车辆的运行工况对粘着系数也有影响，牵引时的粘着系数比制动时要大一些。

(4) 动车有关部件的状态。

1) 各动轴上牵引电动机的特性不完全相同，在同一运行速度下产生牵引力大的轮对将首先发生空转。

2) 各个动轮的直径不同，直径小的动轮发出的牵引力大，容易首先发生空转。

3) 各个动轮的动负荷不同，运行中动负荷轻的动轮将首先空转。

空转必然导致动车的粘着系数减小。

5. 改善粘着的方法和提高粘着系数的措施

(1) 改善粘着的方法。改善粘着的方法有两大类：一是修正轮轨表面接触条件，即改善轮轨表面不清洁状态；二是设法改善轨道车辆的悬架系统，以减轻轮对减载带来的不利影响。

(2) 提高粘着系数的措施。提高粘着系数的措施有很多,如减少轴重转移,减少簧下质量,轮对在构架内的定位刚度不过大,在钢轨上撒砂,牵引电动机无级调速,用机械或化学等方法清洗、打磨钢轨,改进闸瓦材料(如用增粘闸瓦),改善车辆悬架以减小轴重转移等。例如,广州地铁采用电动机无级控制,使牵引电动机负载能自动地随粘着的变化进行调整。

6. 粘着定律

仍以图1-22为例进行说明。当力 F_i 增大时,反作用力 f_i 同样随之增大,这时动轮上的 O' 点与钢轨上的 O' 点没有相对滑动,即 $v_o=0$ 。车轮与钢轨间粘着力极限值 F_{\max} 接近于轮轨间的静摩擦力,即

$$F_{\max}=1000\mu_{\max}P_i \quad (1-7)$$

式中: F_{\max} ——由轮轨间的粘着条件决定的粘着力,单位为N;

μ_{\max} ——最大粘着系数;

P_i ——动轮荷重,单位为kN。

当驾驶员操纵主控制手柄向前推时,动轮作用力 F_i 逐渐增大,钢轨反作用力 f_i 从 f_{i1} 增大到 f_{i2} ,因轮轨间无相对滑动,车轮仍正常向前滚动。当 F_i 增大超过粘着力极限值时,轮轨间的粘着被破坏,动轮因无足够的水平支承力就不能在钢轨上滚动,而开始在钢轨上滑动,造成动轮空转。这时,钢轨对车轮的反作用力 f_i (牵引力)也因由静摩擦力变为动摩擦力而急剧下降。随着轮轨间相对滑动速度的增加,动摩擦因数越来越小,粘着力的下降更为严重。结果动轮以轴为中心加速空转,车轮空转易造成传动装置和走行部分的损坏,并使轨与轮的接触面擦伤。

综上所述,列车牵引力最大值在任何时候都不得超过车辆各动轮与钢轨间粘着力的最大值的总和。这一原理称为粘着定律,可表示为

$$F_{\max} \leq 1000\mu_{\max}P_{\mu} \quad (1-8)$$

式中: F_{\max} ——机车动轮最大轮周牵引力;

P_{μ} ——粘着重量, $P_{\mu}=nP_i$, n 为动轮数量。

实际上,当列车产生牵引力时,各轴的轴重会发生变化,有的增载,有的减载,这称为牵引力作用下的轴重转移,又称为轴重再分配。轴重是指列车在静止状态时每个轮对施加于钢轨的重量。轴重转移将严重影响列车粘着重量的利用,限制动车车辆牵引力的发挥,影响电客列车走行部分及传动机构的强度。轴重转移在某些情况下可以达到轴重的20%或更高,牵引力越大,轴重转移越大。例如,列车起动及爬坡时,牵引力增大,轴重转移增大,随着列车功率增大,单位功率重量减小,粘着重量的利用问题就更为突出了。

二、城市轨道交通车辆运行受力分析

城市轨道交通电动列车运行中若只考虑列车沿轨道前进方向的作用力，则直接影响其运行的力有三种，即牵引力、运行阻力和制动力。列车纵向受力示意图如图1-24所示。这三个力作用于列车，并影响列车运行。因此列车的运行分为三种工况：

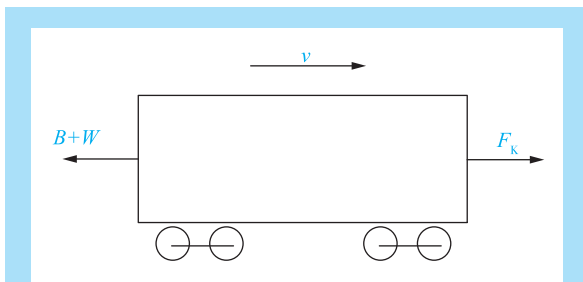


图1-24 列车纵向受力示意图

牵引：作用在列车上的力有列车牵引力 F_k 和列车运行阻力 W ，其合力为 $F_k - W$ ，列车起动的加速。

惰行：作用在列车上的力只有列车运行阻力 W ，其合力为 $-W$ ，列车惯性运行。

制动：作用在列车上的力有列车制动力 B 和列车运行阻力 W ，其合力为 $-(B+W)$ ，列车减速。

1. 牵引力 F_k

列车牵引力是由传动装置引起的与列车运行方向相同的外力，是使列车产生运动和加速的力。牵引力受两个因素影响：一是牵引装置传给轮对的转矩，它与牵引电动机的速度特性和牵引特性有关；二是动轮与钢轨的相互作用，主要是轮轨间的粘着系数以及动轮的荷重。当牵引电动机选定后，轮轨间的粘着就成为影响牵引力的关键因素。

(1) 牵引力的形成。牵引电动机的输出转矩通过电动机轴、传动装置（联轴器、齿轮箱），使车辆动轮获得转矩 M 。假设将车辆悬空，则转矩就是内力矩，只能使车轮发生旋转运动，而不能使车辆发生平移运动。但当车辆置于钢轨上使车轮和钢轨成为有压力的接触时，就产生了车轮作用于钢轨的可以控制的力 F ，而 F 所引起的钢轨反作用于车轮的反作用力 F_k 就是使列车产生平移运动的外力（见图1-25）。这种由钢轨沿列车运行方向加于动轮轮周上的切向外力 F_k 就是列车的轮周牵引力，简称为列车牵引力。

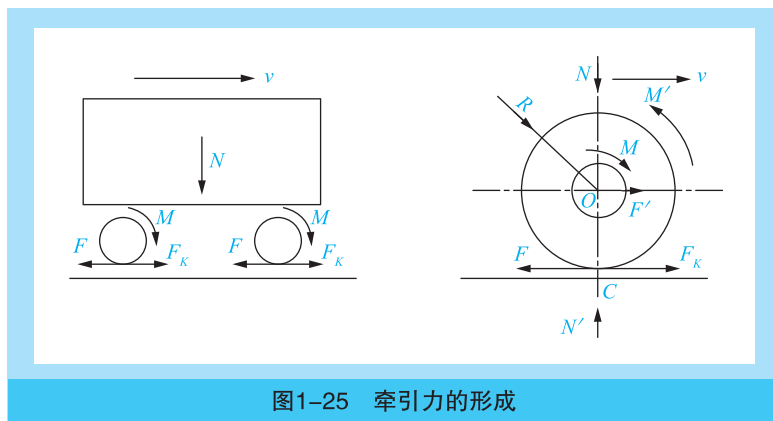


图1-25 牵引力的形成

(2) 城市轨道交通车辆速度的形成。在列车牵引工况下,电动机输出轴上的转矩通过传动装置传递到小齿轮上。设小齿轮按逆时针方向转动产生 M' ,小齿轮驱动轴上的大齿轮,使动轮产生顺时针方向的力矩 M 。而此力矩可用一对力偶(F, F')来代替,该力偶的力臂为 R ,即 $F'=F=M/R$,其作用点分别在 O 点和 C 点上。在轮轨接触良好无滑动的情况下,作用在 C 点的力 F 全部传给钢轨,即轮对对钢轨的作用力。因钢轨静止,钢轨随即给轮对一个与力 F 大小相等、方向相反的反作用力 F_k ,使车轮以轮轨接触点为连续瞬时转动中心向右滚动,从而使车辆向右作平移运动。这个反作用力 F_k 就是使机车前进的唯一外力——列车牵引力。城市轨道交通车辆力的传递过程如图1-26所示。

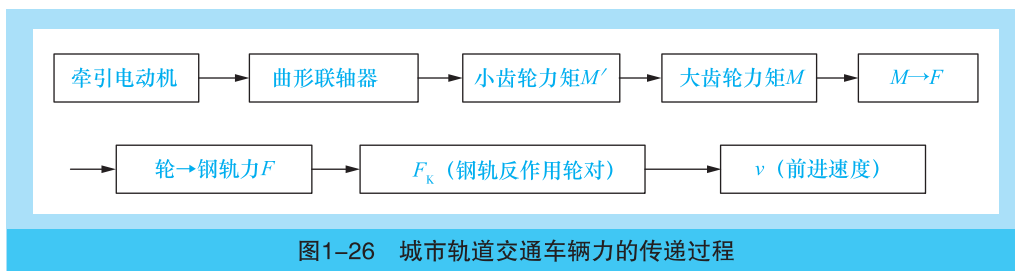


图1-26 城市轨道交通车辆力的传递过程

2. 运行阻力 W

列车运行阻力是列车运行中由于各种原因自然发生的与列车运行方向相反的外力。它可阻止列车发生运动或使列车自然减速,驾驶员无法控制阻力。

阻力根据引起的原因可分为基本阻力和附加阻力。列车运行阻力随所处环境的不同而变化,也与车辆结构设计、保养质量有关。

(1) 基本阻力。基本阻力在列车运行中总是存在的。列车在平直轨道上运行时一般只有基本阻力。产生基本阻力的主要因素有:

- 1) 滚动轴承及车辆各摩擦处之间的摩擦。
- 2) 车轮与钢轨间的滚动摩擦和滑动摩擦。
- 3) 冲击和振动引起的阻力。
- 4) 空气阻力。

基本阻力各因素对列车运行阻力的影响程度与运行速度有关。如低速时,轴承、轮轨等摩擦的影响大,空气阻力的影响小;高速时,空气阻力占主导地位,而摩擦的影响就不大。

对于地铁车辆而言,车辆主要在隧道中运行,由于车辆与隧道的横截面之比很小,在车辆与隧道的间隙中存在着强烈的气流摩擦和车辆前后的空气压力差,使空气阻力成为车辆的主要运行阻力,而且列车运行速度越高,基本阻力越大,因此城轨车辆在外形结构上进行了专门设计以减少空气阻力。例如,地铁车辆在A车(见图1-5)前端下部设计扰流板的目的是减少运行时的空气阻力,高速列车把外形设计成流线型也是为了减少高速时很大的气流阻力。

影响阻力的因素极为复杂，变化也很大，很难进行理论推算，所以一般采用理论和试验相结合，求出经验公式。在车辆单位重量下车辆的基本阻力公式为

$$W=a+bv+cv^2 \quad (\text{N/t}) \quad (1-9)$$

由式(1-9)可以看出，基本阻力与列车速度是二次函数的关系，式中 a 、 b 、 c 均为试验数据。例如，广州地铁1号线列车的基本阻力计算公式为 $W=27+0.0042v^2$ (N/t)。

(2) 附加阻力。它包括列车上坡、经过曲线、起动等发生在特定的情况下的阻力。

1) 坡道阻力 W_i 。列车进入坡道后，由列车重力产生的沿坡道斜面的分力称为坡道阻力。

2) 曲线阻力。列车通过曲线轨道时增加的阻力就是曲线阻力。引起曲线阻力的原因有：车轮对于钢轨的横向及纵向滑动，轮缘与外轨头内侧的摩擦，滚柱轴承的轴端摩擦，中心销及中心销座因转向架的回转而发生的摩擦。曲线阻力与许多因素有关，如曲线半径、运行速度、外轨超高、车重、轴距、踏面的磨损程度等。

3) 起动阻力。起动阻力对城市轨道交通车辆而言，因其起动性能好，故影响不大。

3. 制动力 B

制动力是由制动装置引起的与列车运行方向相反的外力。其作用是使列车产生较大的减速度或制动列车或防溜。驾驶员可以控制制动力。

(1) 制动力的形成。制动俗称刹车，制动性能的好坏在很大程度上限制了车辆的载重和列车的运行速度。地铁车辆有两套制动系统，即电气制动和空气制动，以电气制动为主，停车和紧急制动时采用空气制动（也称摩擦制动）。

摩擦制动和电气制动都是通过轮轨粘着产生制动力的。下面以闸瓦制动为例，说明通过轮轨粘着产生制动力的过程。图1-27所示为闸瓦制动力的形成。

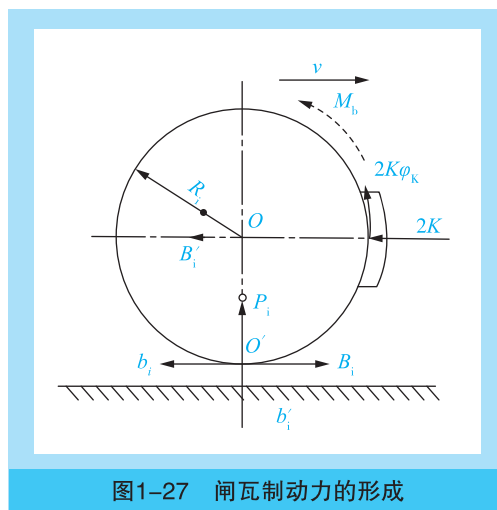


图1-27 闸瓦制动力的形成

设一个轮对上有两块闸瓦，在忽略其他各种摩擦阻力的情况下，轮对在无外力的平直轨道上滚动惰行。

若每块闸瓦以力 K 压向车轮踏面，闸瓦与踏面间会引起与车轮转动方向相反的滑动摩擦力 $2K\varphi_K$ （ φ_K 为动轮与闸瓦间的滑动摩擦因数），对于列车来说，此摩擦力是内力，不能使列车减速。此时制动转矩 M_b 为

$$M_b=2K\varphi_K R_i \quad (1-10)$$

应用类似牵引力形成的分析方法，转矩 M_b 可以用轴心和轮轨接触处的力偶（ B_i, B_i' ）代替。力偶的力臂为车轮 R_i ，作用力 $B_i=B_i'=M_b/R_i=2K\varphi_K$ 。轮轨接触处因轮对的正压力 P_i 而存在粘着，切向力 B_i 将引起钢轨对车轮的静摩擦反作用力 b_i ， $b_i=B_i=2K\varphi_K$ 。 b_i 作用在车轮踏面的 O' 点，方向与列车运行方向相反，是阻止列车运行的外力，称为制动力。制动力 b_i 也是轮轨间的粘着力，因而也受到粘着条件的限制，即

$$b_i \leq P_i u_b \quad (1-11)$$

式中： P_i ——动车或拖车轮对的轴重；

u_b ——制动时轮轨间的粘着系数。

整个列车总的闸瓦制动力为所有轮对闸瓦制动力之和，即

$$B=\sum b_i \quad (1-12)$$

由以上分析可知，制动力的调节可以通过改变闸瓦压力来进行，但不得大于粘着条件所允许的最大值，否则车轮会被闸瓦“抱死”，使车轮与钢轨间产生相对滑动。此时车轮的制动力将变为滑动摩擦力，这种现象称为“滑行”。滑行时制动力大为降低，制动距离增加，还会擦伤车轮与钢轨的接触面，因此应尽量避免。

电气制动与摩擦制动的不同只是制动转矩由电动机产生，而制动力都是通过轮轨粘着产生的，同样应避免出现“滑行”。

（2）制动力与闸瓦系数。闸瓦与车轮间的摩擦因数 φ_K 与闸瓦材质、列车速度、闸瓦压力、闸瓦温度及状态有关。一般来说，闸瓦制动力 B 与速度成反比，速度越低，制动力越大。在一定的闸瓦压力 K 下，制动力的大小取决于闸瓦与车轮间的摩擦因数 φ_K 的值。从制动开始到停车， φ_K 不断变化。列车运行时，增大制动力可缩短制动距离并提高行车的安全性。但是并不是制动力越大，制动效果越好。制动力也和牵引力一样，必须遵守粘着定律，否则当制动力大于轮轨间的粘着力时，就像牵引力出现“空转”一样，也会发生轮轨间的“滑行”。列车一旦滑行，首先是制动力下降，其次会发生轮对踏面及轨面的擦伤。这就要求驾驶员在驾驶列车时（尤其是天气不好时，轮轨粘着状态不良），要特别加以注意。

为了保证正常制动，制动力必须不超过粘着力，即

$$\sum K\varphi_K \leq \varphi_K n \cdot 2G \quad (t) \quad (1-13)$$

式中： φ_k ——闸瓦与车轮间的摩擦因数；

n ——每个轮对的闸瓦数；

$2G$ ——轴荷重。

为了提高列车运行的可靠性，城市轨道交通列车上设有空气制动防空转/滑行保护装置，当某轴制动力过大，轮轨间发生滑动时，电子控制单元控制防滑阀将关闭压缩空气通路，开启制动缸通向大气的通路，进行排风缓解，然后再重新恢复正常制动。这样使车辆在粘着不利的情况下，尽快恢复制动作用，防止轮对踏面和钢轨造成擦伤。

项目小结

本项目系统阐述了城市轨道交通车辆电气控制系统的构成。首先对城市轨道交通车辆电气控制系统的基本概念做了基本概述，对城市轨道交通车辆总体控制和车辆电气部件与设备做了简要的说明，重点对车辆电气控制系统主要部件功能做了详尽的阐述，最后对车辆运行工况与受力分析做了阐述。学生通过对本项目的学习，能够领会并掌握一定的基础知识，通过实践灵活运用。

学习检测

一、填空题

- 城市轨道交通车辆（ ）根据（ ）给出的命令对各功能（ ）进行调控，并在各个功能级上（如牵引控制、制动控制等）保证列车（ ）的实现。
- 城市轨道交通车辆的（ ）实际上是对（ ）的控制。在轨道交通运输中，采用电动机（ ）来满足（ ）的电气部分，称为电力牵引（ ）系统。
- 列车的各车辆间（ ）靠密接式（ ）实现（ ）、电气、（ ）的整体连接。
- 城市轨道交通车辆电气控制系统（ ）是用来对城市轨道交通车辆以及其他的牵引设备进行（ ）、（ ）、（ ）、保护和调节的（ ），称为牵引电器。
- 受电弓靠滑动接触受流，是（ ）与（ ）之间的连接环节，其性能的（ ）直接影响城市轨道交通车辆工作的（ ）。
- 电磁接触器一般由电磁机构、（ ）、（ ）、（ ）、支架和（ ）等组成。

7. 绝大多数城市轨道交通车辆属于()，即()依赖于()和钢轨的()。
8. 粘着系数与轮荷重、()、传动装置、()、车轮与钢轨的材质及()、()等因素有关。
9. 列车运行()是列车运行中由于()自然发生的与()的外力。

二、问答题

1. 根据电动机形式的不同，控制系统可分为哪两大类？
2. 请详细说明城市轨道交通车辆内部包括哪些设备。
3. 牵引电器一般分为哪三大部分？
4. 请详细说明受电弓受流性能的基本要求。
5. 衡量HSCB性能的主要指标有哪两个？
6. 浪涌电压吸收器的主要技术参数有哪些？
7. 继电器的主要技术参数有哪些？
8. 城市轨道交通电动列车运行中若只考虑列车沿轨道前进方向的作用力，则直接影响其运行的力有哪三种？
9. 列车牵引力是由传动装置引起的与列车运行方向相同的外力，是使列车产生运动和加速的力，牵引力受哪两个因素影响？
10. 列车通过曲线轨道时增加的阻力就是曲线阻力，引起曲线阻力的原因有哪些？